

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 537.86

ТУННЕЛЬНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ¹

© 2016 г. А. А. Артанов^{1,2,*}, К. В. Калашников^{1,2}, В. П. Кошелец¹, Г. де Ланге³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая 11, стр. 7

²Московский физико-технический институт (государственный университет)
Российская Федерация, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

³Нидерландский институт космических исследований Нидерланды, 9747, Гронинген, Ландлевен, 12

*E-mail: artanov@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 21.03.2016 г.

Исследована возможность использования туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) в системе мультиплексирования для задания переменного тока через массивы детекторов на краю сверхпроводящего перехода и считывания принимаемого сигнала, а также для задания постоянного тока через массивы сверхпроводящих квантовых интерферометров. Экспериментально изучена работа СИС-преобразователя частоты при относительно низких рабочих частотах (менее 10 ГГц). Реализованы различные режимы работы; потери преобразования в квази-частичном режиме составили 8 дБ, мощность насыщения по выходу составляет –58 дБм. Показана возможность повышения одновременно нескольких частот входного сигнала. Продемонстрирована возможность использования СИС-перехода в режиме источника тока, управляемого внешним высокочастотным сигналом.

DOI: 10.7868/S0033849416090023

ВВЕДЕНИЕ

Болометры на краю сверхпроводящего перехода (transition edge sensor, TES) зарекомендовали себя как надежные и чувствительные детекторы мощности электромагнитного излучения, способные регистрировать излучение в диапазоне от терагерцевого до рентгеновского [1]. Рабочая температура таких детекторов составляет менее 100 мК. Сигнал с TES-болометров регистрируется при помощи усилителей на сверхпроводящих квантовых интерферометрах (СКВИД). Система с частотным разделением каналов позволила считывать сигнал с нескольких болометров при помощи одного СКВИДа, значительно уменьшив приток тепла в криостат за счет сокращения количества проводов.

Ранее в Нидерландском институте космических исследований (НИКИ, SRON) было предложено использовать в таких системах туннельные структуры “сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник” (СИС) в качестве источников тока и преобразователей частоты [2], что позволяет управлять постоянным током через СКВИД-усилители и переменным сигналом через TES-боло-

метры при помощи трех коаксиальных кабелей, а это дополнительно сокращает количество проводов. Предложенная система также может найти применение в многопиксельных СКВИД-системах для неразрушающего контроля материалов. Цель данной работы – исследовать возможность применения СИС-переходов в режиме источника тока и преобразователя при относительно низких (<10 ГГц) частотах, которые будут использоваться в системе.

1. ИСТОЧНИК ТОКА НА СИС-ПЕРЕХОДЕ

Внешний высокочастотный (ВЧ) сигнал влияет на вольт-амперную характеристику (ВАХ) СИС-перехода таким образом, что если задать напряжение на переходе, близкое к щелевому, то, изменяя мощность ВЧ-сигнала, можно управлять током через переход (рис. 1). Это позволяет использовать СИС-переход как регулируемый источник тока, управляемый мощностью внешнего сигнала. В системах с большим количеством СКВИДов можно использовать СИС-переходы как источники тока, управляемые ВЧ-сигналами, подаваемыми по одному коаксиальному кабелю.

Принципиальная схема эксперимента для демонстрации принципа работы системы представ-

¹ Работа удостоена премии на конкурсе молодых ученых им. Ивана Анисимкина.

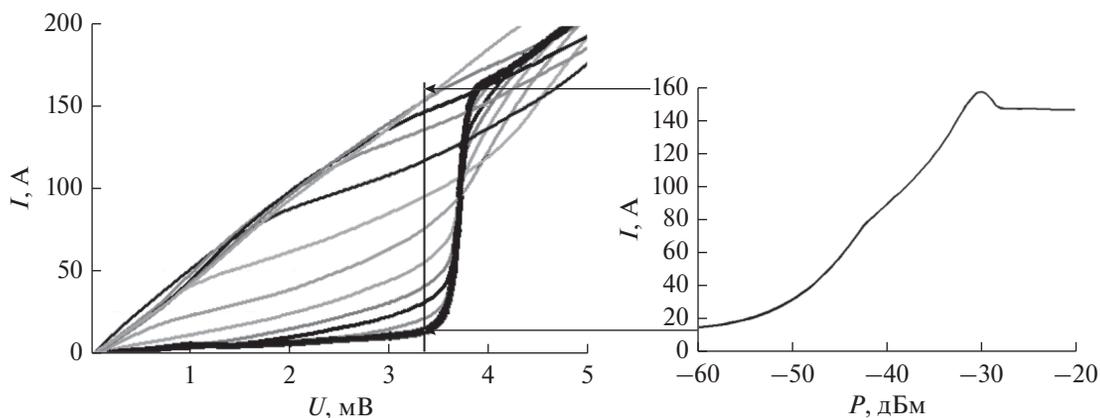


Рис. 1. Принципиальная схема работы источника тока на СИС-переходе.

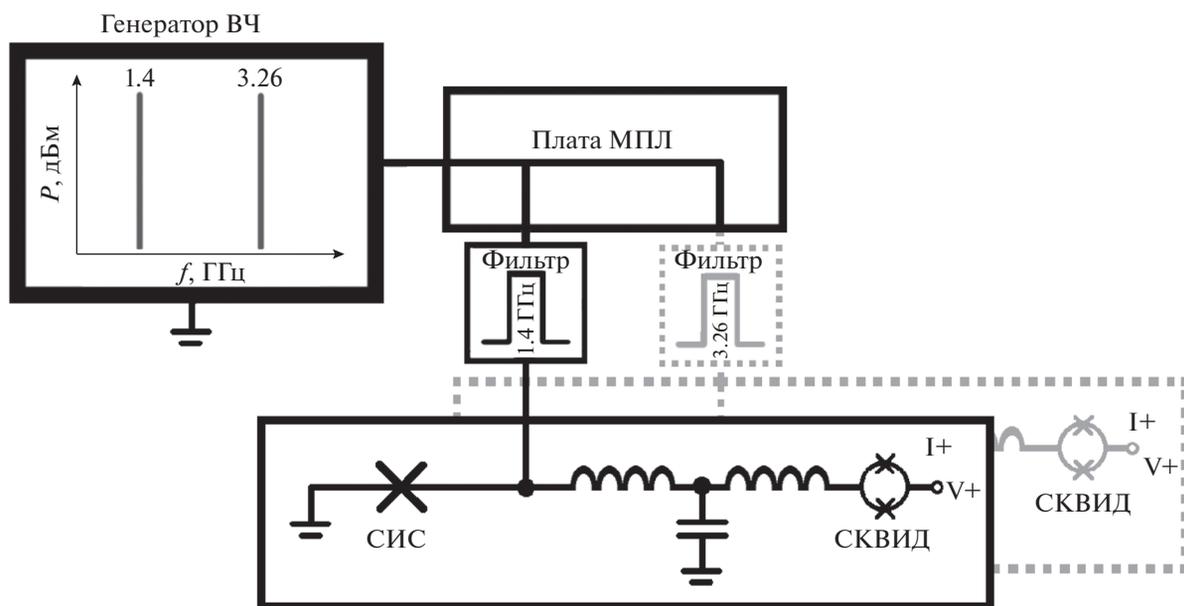


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для демонстрации работы СИС-перехода в режиме источника тока, управляемого внешним ВЧ-сигналом: генератор ВЧ-сигнала; плата с микрополосковыми линиями (МПЛ); два фильтра, пропускающие сигналы с частотами 1.4 и 3.26 ГГц; два СИС-перехода; два СКВИД-устройства.

лена на рис. 2. Каждому переходу соответствует один узкополосный фильтр, который пропускает с генератора ВЧ сигнал определенной частоты (в нашем случае 1.4 и 3.26 ГГц) и не пропускает сигналы других частот. Таким образом, задавая сигналы конкретных частот, можно управлять током через каждый СИС-переход в отдельности.

При проведении эксперимента использовались два туннельных перехода Nb–AlO_x–Nb, щелевое напряжение $V_g = 2.8$ мВ, сопротивление в нормальном состоянии $R_n = 3$ Ом, площадь $S = 1$ мкм²; СКВИД был заменен на резистор с эквивалент-

ным сопротивлением. На обоих переходах было задано напряжение, близкое к щелевому 2.58 мВ. Подавая ВЧ-сигналы с частотой, соответствующей фильтрам (1.4 и 3.23 ГГц), мы управляли током через один из переходов; при этом ток через другой переход оставался неизменным (рис. 3).

Таким образом, через один коаксиальный кабель мы управляли током через два СИС-устройства; увеличение количества управляемых СИС-устройств или приложение нескольких высокочастотных сигналов разной частоты одновременно не сказывается на результатах эксперимента.

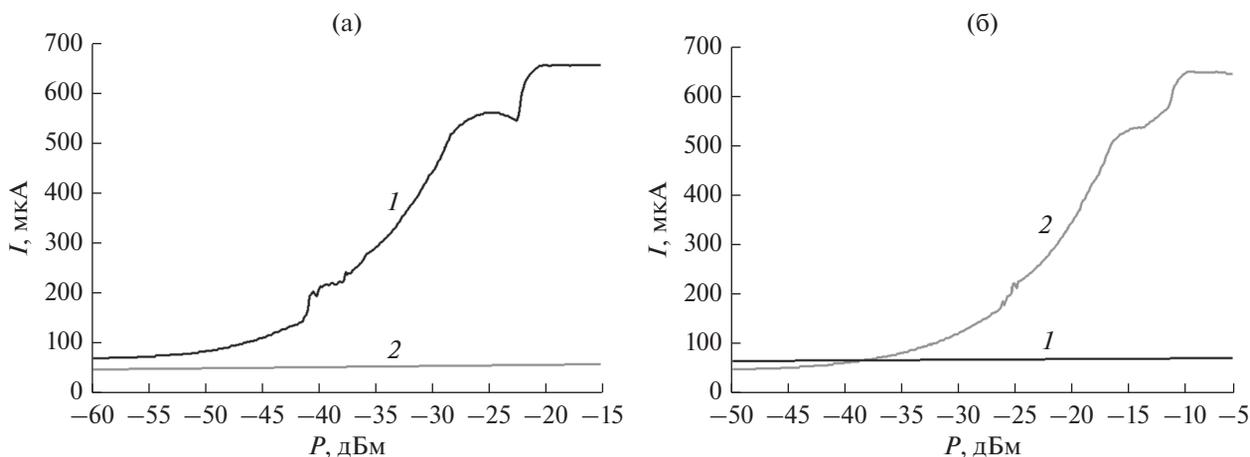


Рис. 3. Зависимость силы тока, проходящего через каждый из двух СИС-переходов, которые соответствуют двум фильтрам, пропускающим сигналы с частотами 1.4 (1) и 3.26 ГГц (2), от мощности внешнего ВЧ-сигнала с частотой 1.4 (а) и 3.26 ГГц (б).

2. СИС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

В криогенной системе мультиплексирования, описанной в работе [2], было предложено использовать СИС-смесители для понижения частоты входных сигналов для смещения ТЕС-боллометров, а также для повышения частоты выходных сигналов. Традиционно СИС-смесители применяются в “квантовом” режиме работы на частотах более 100 ГГц, когда ширина квазичастичной ступени по напряжению больше, чем величина размытия щелевого напряжения. В криогенной системе мультиплексирования предлагается использовать СИС-смеситель в “классическом” режиме работы – при частотах менее 10 ГГц. Сигнал такой частоты легко передавать по коаксиальному кабелю, а низкая мощность выделения тепла в СИС-переходе позволит упростить систему охлаждения.

Для проведения эксперимента был изготовлен измерительный зонд (рис. 4), который позволяет проводить измерения при температуре жидкого гелия непосредственно в транспортном сосуде Дьюара. Образец СИС устанавливается в головку, которая помещается в магнитный экран из пермаллоя и закрепляется на нижнем конце стальной трубки. Внутри трубки помещаются кабели для смещения СИС и коаксиальный кабель для подачи ВЧ-сигнала на образец СИС. Нижний конец трубки опускается в сосуд Дьюара, а необходимые для проведения измерений приборы подключаются к кабелям на верхнем конце трубки.

При измерениях использовался образец Nb–AlN–NbN со следующими параметрами: $V_g = 3.7$ мВ, $R_n S = 43$ Ом · мкм², $R_n = 21.4$ Ом, $R_j/R_n = 14$ (R_j – сопротивление участка ВАХ ниже напряжения щели), $S = 2$ мкм².

Было проведено исследование зависимости потерь преобразования от напряжения на СИС и мощности гетеродинного сигнала в режимах с подавлением критического тока внешним магнитным полем – квазичастичный режим, и без подавления – джозефсоновский режим (рис. 5). На вход смесителя подавались исследуемый сигнал с частотой 223 МГц и гетеродинный сигнал с частотой 5 ГГц. На выходе системы мы получали сигнал промежуточной частоты (ПЧ) 5.223 ГГц.

Потери преобразования в квазичастичном режиме составили до 9 дБ, а мощность насыщения по выходу до –58 дБм, при работе в джозефсоновском режиме потери преобразования в некоторых рабочих точках значительно меньше.

Каждый из режимов имеет свои преимущества и недостатки. О потерях преобразования в джозефсоновском режиме было сказано выше. Кроме того, в данном режиме не требуется приложение внешнего магнитного поля, как в случае квазичастичного режима. Однако, джозефсоновская генерация может быть источником дополнительных шумов [3]. Также недостатком можно считать то, что джозефсоновский режим реализуется в достаточно узкой области по напряжению на переходе и мощности гетеродина, что может быть неудобно при работе с большим количеством (сотни) смесителей.

Для проверки возможности повышения частоты одновременно нескольких сигналов на одном смесителе на вход был подан сигнал частотой 223 МГц с амплитудной модуляцией 0.6 МГц, что равносильно подаче трех ВЧ сигналов разной частоты. На рис. 6 изображены спектры входного ВЧ-сигнала и сигнала ПЧ в джозефсоновском и квазичастичном режимах. Видно, что уровень шума при работе в джозефсоновском режиме несколько вы-

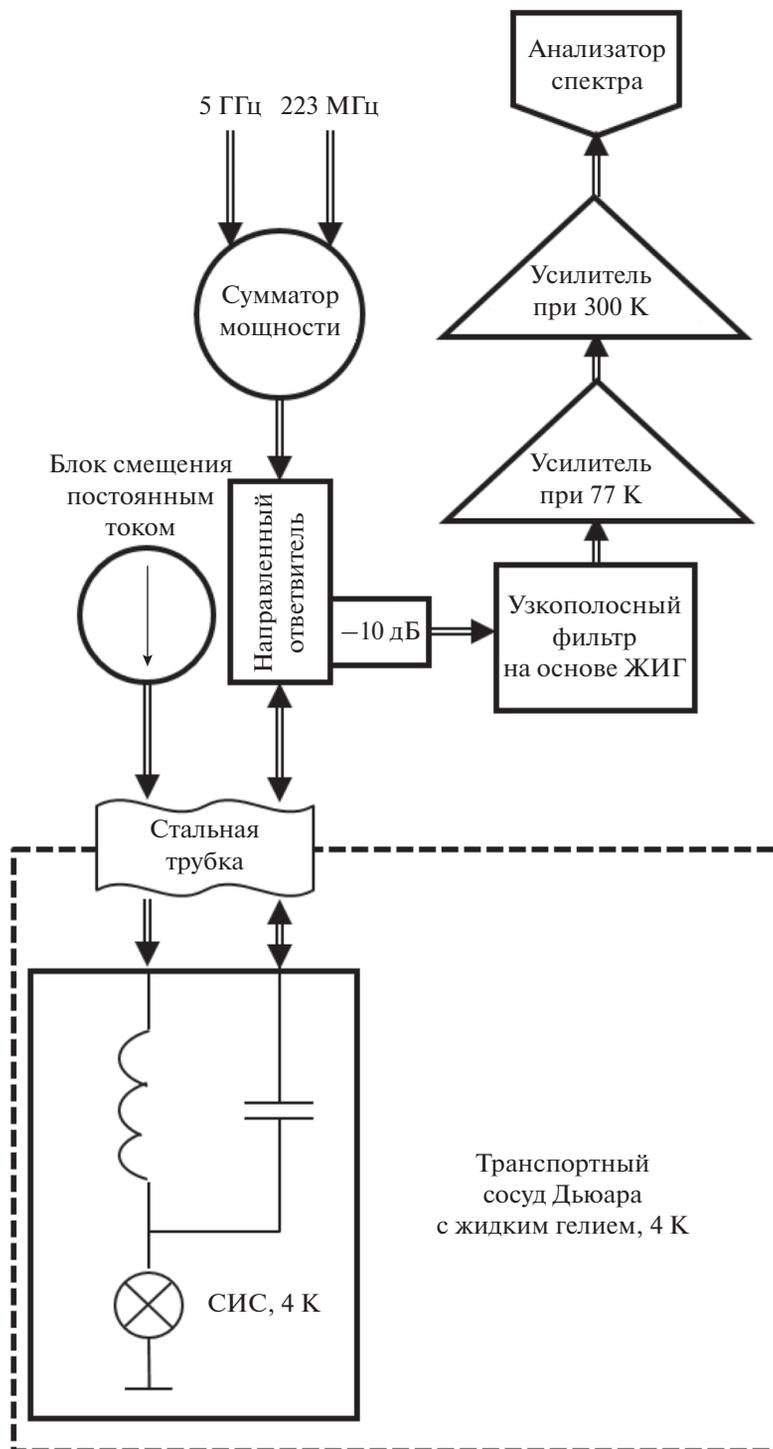


Рис. 4. Схема измерительного зонда для проведения измерений в транспортном сосуде Дьюара.

ше, чем в квазичастичном. Наличие нескольких сигналов не сказывается на работе смесителя, потери преобразования соответствуют предыдущим экспериментам.

Используя упрощенную модель СИС-смесителя, описанную в работе [4], было выполнено сравнение данных, полученных экспериментально и при численном моделировании (рис. 7), кото-

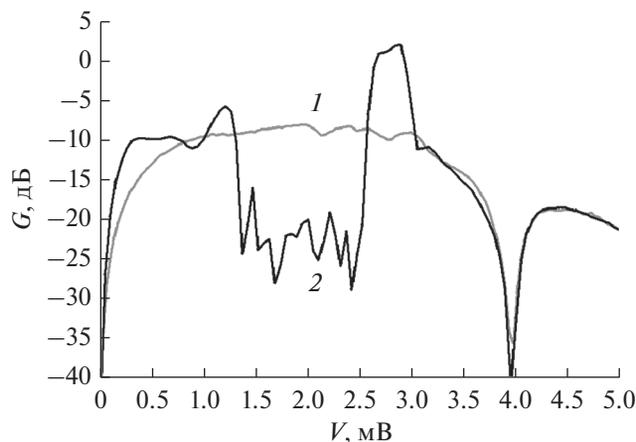


Рис. 5. Экспериментально измеренная зависимость потерь преобразования от напряжения на переходе при мощности гетеродинного сигнала -40 дБм с подавлением (1) и без подавления (2) критического тока.

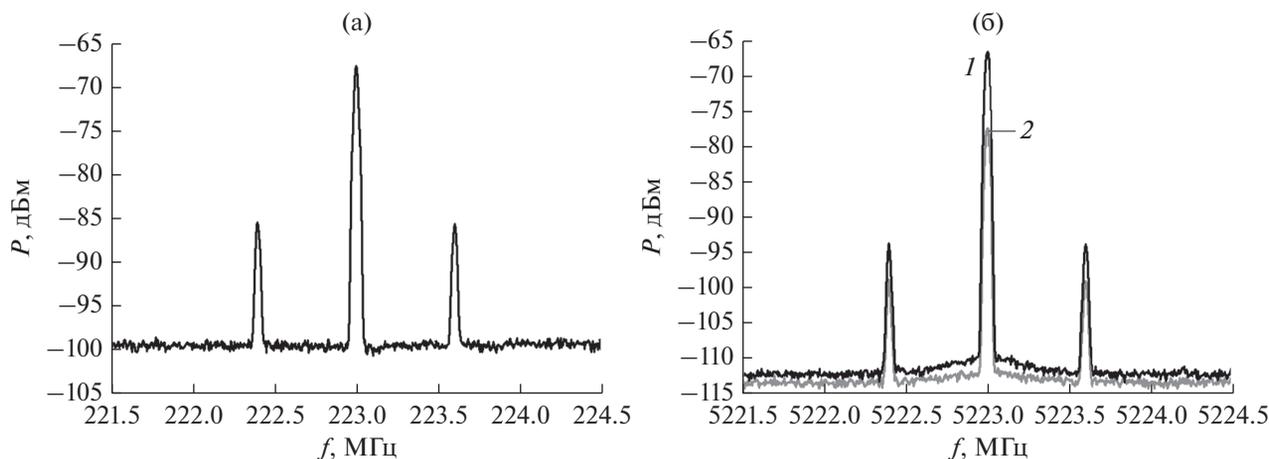


Рис. 6. Спектры входного сигнала ВЧ 223 МГц с амплитудной модуляцией 0.6 МГц (а) и выходного сигнала ПЧ (б): 1 – джозефсоновский режим смещения, 2 – квазичастичный режим. Мощность сигнала гетеродина -40 дБм, напряжение на переходе 1.6 мВ.

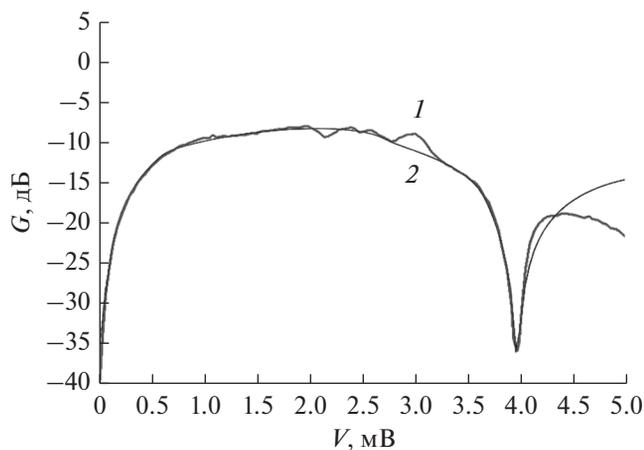


Рис. 7. Экспериментальные (1) и смоделированные (2) зависимости потерь преобразования G квазичастичного режима от напряжения на переходе V при мощности гетеродинного сигнала -40 дБм.

рые качественно согласуются друг с другом. Различия связаны с упрощениями, использованными в модели, а также с тем фактом, что критический ток в эксперименте подавлен не полностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализован источник тока, управляемый внешним ВЧ-сигналом, на СИС-переходе. Апробирована возможность управления током через два СИС-перехода при помощи одного коаксиального кабеля для смещения массивов СКВИД-устройств. Реализован СИС-преобразователь в диапазоне относительно низких частот (~ 5 ГГц). Продемонстрирована работа преобразователя на джозефсоновской и квазичастичной нелинейности, проведено сравнение режимов. Определены диапазоны рабочих значений для смещения на

переходе и мощности гетеродина. Проведена оценка основных параметров перехода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Irwin K.D., Hilton G.C.* Cryogenic Particle Detection / Ed. Enss Ch. Berlin: Springer, 2005. P. 63.
2. *de Lange G.* // J. Low Temperature Phys. 2014. V. 176. № 3–4. P. 408.
3. *Leridon B., Febvre P., George S. et al.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. № 6. P. 3024.
4. *Калашиников К.В., Худченко А.В., Барышев А.М., Кошелец В.П.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 6. С. 751.
5. *Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. AS-11. № 1. Pt. 1. P. 816.
6. *Tucker J.R., Feldman M.J.* // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1055.
7. *Tien P.K., Gordon J.P.* // Phys. Rev. 1963. V. 129. № 2. P. 647.
8. *Ermakov A.B., Shitov S.V., Baryshev A.M. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. AS-11. № 1. Pt. 1. P. 840.
9. *Withington S., Kittara P., Yassin G.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. № 12. P. 9812.
10. *Kittara P., Withington S., Yassin G.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. № 2. P. 024508.
11. *Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V. et al.* // IEEE Trans. 2003. V. AS-13. № 2. P. 107.

Сдано в набор 12.05.2016 г.	Подписано к печати 11.07.2016 г.	Дата выхода в свет 23.09.2016 г.	Формат 60 × 88 ¹ / ₈
Цифровая печать	Усл. печ. л. 12.25	Усл. кр.-отг. 2.4 тыс.	Уч.-изд. л. 12.3
	Тираж 186 экз.	Зак. 545	Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Институт радиотехники и электроники РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
 Отпечатано в ППП «Типография “Наука”», 121099 Москва, Шубинский пер., 6