

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ГИРОТРОНА

© 2020 г. Б. З. Мовшевич^а, А. И. Цветков^{а,*}, М. Ю. Глявин^а, А. П. Фокин^а

^а Институт прикладной физики РАН
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*e-mail: tsvetkov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 23.05.2020 г.

После доработки 01.06.2020 г.

Принята к публикации 03.06.2020 г.

Описывается устройство и приводятся данные испытаний блока быстрой регулировки анодного напряжения гиротрона. Блок позволяет пропорционально управляющему сигналу изменять напряжение на изолированном аноде гиротрона, имеющем емкость относительно земли 100–200 пФ, в пределах от 0.4 до 1.6 кВ с характерным временем около 1 мкс. Это позволяет использовать данный блок в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты гиротрона. Управление частотой и фазой излучения открывает возможности для создания мощных высокостабильных генераторов и синхронизации большого числа гиротронов, что представляется актуальным, например, для задач высокоградиентного ускорения электронов.

DOI: 10.31857/S0032816220060142

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы ознаменовались значительным прогрессом в развитии гиротронов, которые обеспечивают рекордные значения непрерывной и средней мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Основной областью применения гиротронов остается нагрев плазмы и поддержание тока плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время несколько стран, включая Россию, разрабатывают гиротроны, имеющие выходную мощность 1 МВт на частоте 170 ГГц в непрерывном режиме с к.п.д. 50% для международного реактора ИТЭР [1, 2]. Кроме того, гиротроны умеренной мощности активно используются в источниках ионов [3], для технологических [4] и ряда других приложений.

Весьма привлекательной представляется возможность практически неограниченного повышения мощности за счет когерентного сложения излучения от нескольких гиротронов. Для этого необходимо обеспечить высокую стабильность их выходных параметров, а также возможность управления частотой и фазой каждого из этих генераторов.

Еще одно потенциальное приложение мощных гиротронов — их использование в перспективных высокоградиентных ускорителях заряженных частиц [5]. Здесь также помимо высокой выходной мощности необходимо обеспечить синхрониза-

цию фаз излучения гиротронов, питающих разные ускоряющие секции. При этом сдвиг фаз между соседними секциями должен управляться с высокой точностью.

Наконец, гиротроны с высокой стабильностью выходных параметров востребованы для диагностики плазмы методом коллективного томоновского рассеяния [6].

Все перечисленные задачи можно решить путем захвата частоты гиротрона внешним (ведущим) высокостабильным источником с умеренным уровнем выходной мощности. Для этой цели разработан и в настоящее время находится на стадии изготовления гиротрон-драйвер [7] с частотой 170 ГГц и выходной мощностью около 25 кВт, сигналом которого предполагается захватить гиротрон мегаваттного уровня мощности.

Для стабилизации частоты излучения может быть использована схема фазовой автоподстройки частоты (ф.а.п.ч.) на основе цепи обратной связи с внешним высокостабильным опорным генератором малой мощности. Для этого необходимо обеспечить механизм быстрого регулирования частоты гиротрона.

Существуют различные способы управления частотой генерации гиротронов [8–11]. В силу релятивистской зависимости циклотронной частоты электронов от их энергии очевидными являются схемы, в которых частота регулируется за счет изменения катодного (ускоряющего) напря-

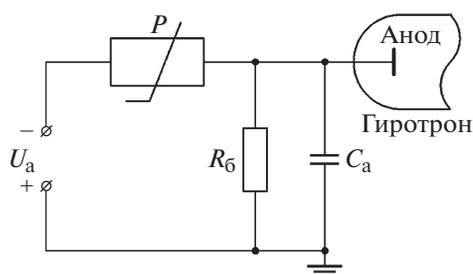


Рис. 1. Схема регулирования анодного напряжения гиروتрона. P — быстродействующий регулятор анодного напряжения. C_a — емкость между анодом гиروتрона и землей.

жения, т.е. энергии электронов. При этом для компенсации быстрых уходов частоты необходимо за короткие характерные времена изменять параметры мощного высоковольтного источника, что драматически увеличивает его стоимость и неизбежно приводит к существенному изменению мощности выходного излучения.

Другой способ возможен благодаря использованию в гиروتронах схемы рекуперации — подаче на электрически изолированный резонатор прибора ускоряющего напряжения. Ток на резонатор практически стремится к нулю, однако большая емкость между коллектором и резонатором налагает дополнительные условия на оконечный каскад управляющей схемы — согласно оценкам, мощность выходного усилителя в полосе управления должна составлять несколько киловатт.

Наиболее экономичным и эффективным способом, обеспечивающим требуемое быстродействие, представляется управление частотой гиروتрона с триодной электронной пушкой за счет изменения напряжения на изолированном бестоковом аноде, емкость которого относительно других электродов электронно-оптической системы невелика. В этом случае энергия электронов, которая определяется потенциалом катода относительно резонатора, фиксирована, а изменение анодного напряжения влияет на питч-фактор электронов (отношение вращательной скорости к поступательной). Управление питч-фактором сопровождается изменением как активной, так и реактивной составляющих проводимости электронного пучка относительно рабочей моды резонатора, вследствие чего изменяется частота автоколебаний. Значение частоты при этом остается в пределах полосы, определяемой добротностью рабочей моды резонатора.

При использовании ф.а.п.ч. разница между частотой гиروتрона и частотой маломощного опорного генератора детектируется частотно-фазовым детектором. Сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз сигналов, усиливается и подается на управляющий анод, смещая частоту

гиروتрона к частоте высокостабильного опорного сигнала. Подобный подход успешно применялся в работе [12], позволив достигнуть рекордных значений стабильности частоты излучения.

Ниже описывается быстродействующий регулятор анодного напряжения гиروتрона, который будет использован в цепи обратной связи системы ф.а.п.ч. для подстройки и стабилизации выходных параметров ведущего гиروتрона (мастер-генератора).

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Основным фактором, оказывающим влияние на стабильность выходных параметров гиروتрона, являются пульсации ускоряющего (катодного) напряжения. Измерение нестабильности выходного напряжения катодного источника питания показало, что для компенсации воздействия этого фактора скорость изменения анодного напряжения гиروتрона должна составлять по меньшей мере 100 В/мкс.

Для компенсации влияния пульсаций мощного высоковольтного источника питания на стабильность частоты излучения гиروتрона-драйвера, а также для подстройки частоты к целевому значению с учетом возможных ошибок изготовления резонатора достаточно иметь возможность регулировки анодного напряжения в диапазоне от 0.4 до 1.6 кВ. В середине диапазона управляющего сигнала фазового детектора системы автоподстройки частоты напряжение на аноде должно составлять 1 кВ, что соответствует номинальному режиму работы гиروتрона.

Далее описывается устройство разработанного блока быстрого управления анодным напряжением. Структурная схема регулирования анодного напряжения гиروتрона приведена на рис. 1.

Для питания анода гиروتрона используется серийный высоковольтный источник регулируемого стабилизированного напряжения U_a . По оценкам для разработанного гиروتрона [7] емкость C_a составляет 100–200 пФ.

Для создания цепи разряда емкости C_a , что обусловлено необходимостью быстрого снижения напряжения на аноде гиروتрона в процессе стабилизации, параллельно аноду гиروتрона подключается балластный резистор R_6 . Ток, протекающий через резистор R_6 , должен превышать величину, определяемую соотношением $I_6 = C_a dU_a/dt$, составляющую десятки миллиампер.

Исходя из того, что нижняя граница диапазона регулировки анодного напряжения равна 400 В, сопротивление R_6 выбрано равным 20 кОм. Рассеиваемая мощность, на которую должен быть рассчитан балластный резистор, составляет не менее

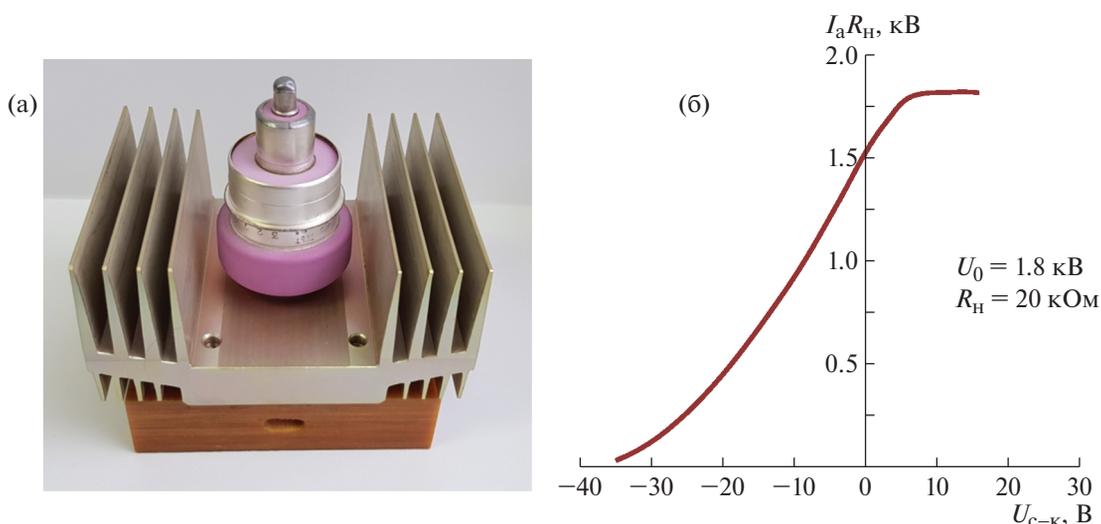


Рис. 2. Внешний вид триодной лампы ГИ-7Б с дополнительным радиатором (а); б – анодно-сеточная характеристика лампы ГИ-7Б, полученная экспериментально. $U_0 = 1.8$ кВ – напряжение источника питания; $R_H = 20$ кОм – резистор, на который была нагружена лампа; I_a – сила тока, протекающего через резистор R_H .

$U_{a\max}^2/R_G \approx 130$ Вт. Из рис. 1 следует, что суммарное значение тока, потребляемое от анодного источника и протекающего через регулятор P , складывается из тока через балластный резистор R_G , емкость C_a , анодного тока гиротрона и может достигать 200 мА.

Исходя из изложенных выше требований и учитывая, что регулятор находится под потенциалом анода гиротрона, в качестве активного элемента регулятора выбрана электронная лампа – импульсный генераторный металлокерамический триод ГИ-7Б с воздушным охлаждением. На рис. 2а пока-

зан внешний вид лампы ГИ-7Б с дополнительным радиатором.

К достоинствам, определившим выбор данной лампы, следует отнести малые габариты (длину < 100 мм и диаметр 47 мм); высокую крутизну характеристики ($S = 23$ мА/В), что значительно упрощает систему управления лампой; величину допустимого анодного напряжения 5 кВ; значительную мощность, рассеиваемую анодом лампы (до 350 Вт); малую мощность накала. Межэлектродные емкости ГИ-7Б составляют единицы пикофард, что позволяет считать ее практически

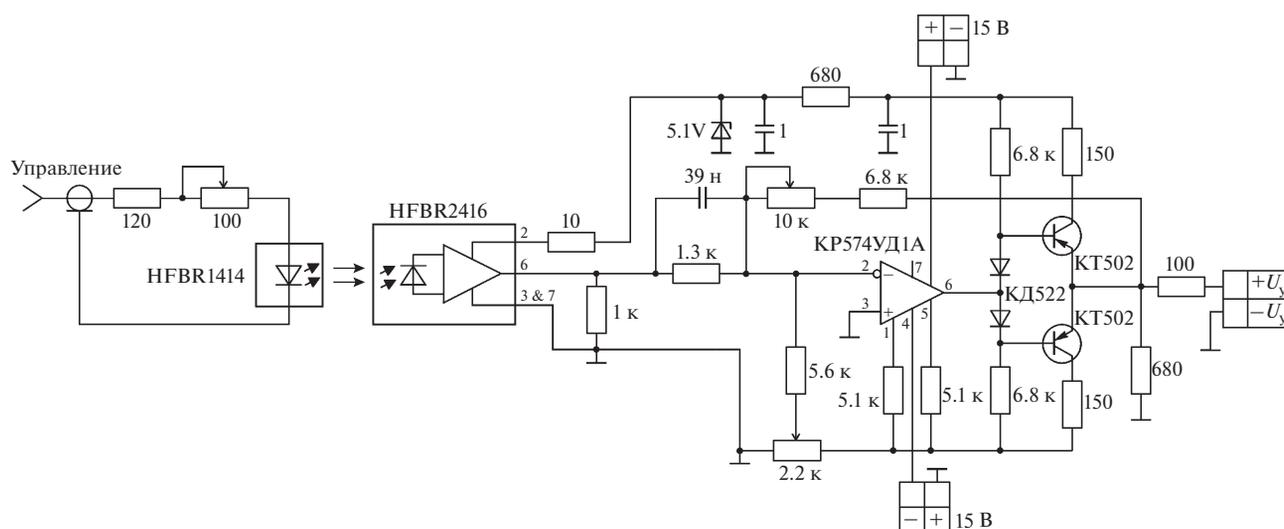


Рис. 3. Принципиальная схема управления лампой-регулятором.

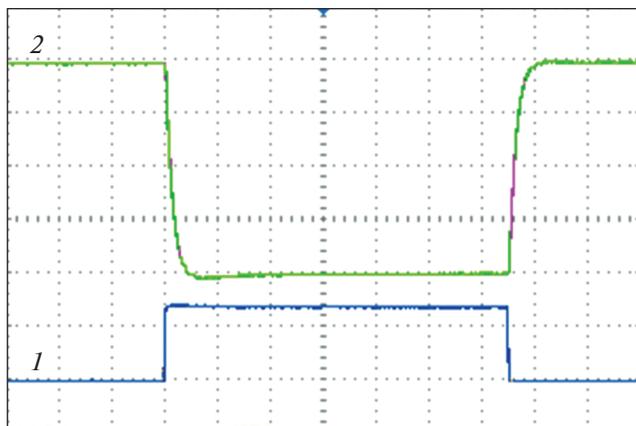


Рис. 4. Осциллограммы входного (1) и выходного (2) сигналов модуля управления, полученные на макете. Масштаб по вертикали 5 В/деление, по горизонтали – 5 мкс/деление.

безынерционным прибором в рассматриваемом временном диапазоне.

Экспериментально были получены анодно-сеточные характеристики лампы ГИ-7Б, нагруженной на резистор $R_n = 20$ кОм, при различных напряжениях питания. Наиболее подходящая для рассматриваемой задачи характеристика приведена на рис. 26. Из рисунка видно, что при напряжении источника питания $U_0 = 1.8$ кВ требуемый диапазон выходных напряжений от 0.4 до 1.6 кВ обеспечивается при изменении напряжения сетка–катод U_{c-k} лампы от -22 до $+2$ В. При этом напряжение на нагрузке, равное 1 кВ, достигается при напряжении сетка–катод -8.6 В.

Создав положительное смещение $U_{cm} = +8.6$ В на катоде лампы включением в цепь катода соответствующего стабилитрона, заданное стационарное выходное напряжение 1 кВ обеспечивает-

ся при нулевом напряжении управления лампой U_y ($U_y = U_{c-k} + U_{cm}$). При этом необходимый диапазон выходных напряжений 0.4–1.6 кВ обеспечивается изменением напряжения U_y в пределах от -12 до $+12$ В, что, в свою очередь, позволяет управлять лампой непосредственно с помощью усиленного операционного усилителя на серийной микросхеме.

Принципиальная схема устройства, позволяющая трансформировать сигнал с выхода фазового детектора, изменяющийся в диапазоне от 0 до $+10$ В, в сигнал, необходимый для управления электронной лампой-регулятором (-12 В/ $+12$ В), представлена на рис. 3.

Так как регулирующий триод находится под высоким потенциалом, то и модуль управления лампой, источник накала лампы и вспомогательные источники питания также должны быть изолированы от земли на напряжение не менее 2 кВ. Для изоляции управляющего сигнала с фазового детектора, поступающего на вход модуля управления регулирующей лампы, используется оптоэлектронная развязка. В качестве передатчика сигнала управления применена оптопара HFBR1414/HFBR2416. Для линейного широкополосного усиления сигнала управления использован быстродействующий операционный усилитель KP574УД1А, имеющий скорость нарастания выходного сигнала 50 В/мкс.

Как видно из рис. 3, микросхема KP574УД1А выполняет функции инвертирующего усилителя и сумматора. На инвертирующий вход микросхемы поступает сигнал с оптического приемника и постоянное отрицательное смещение. Отрицательное смещение необходимо для компенсации положительного уровня, присутствующего на выходе волоконно-оптического приемника HFBR2416, и создания разнополярного сигнала на сетке лампы.

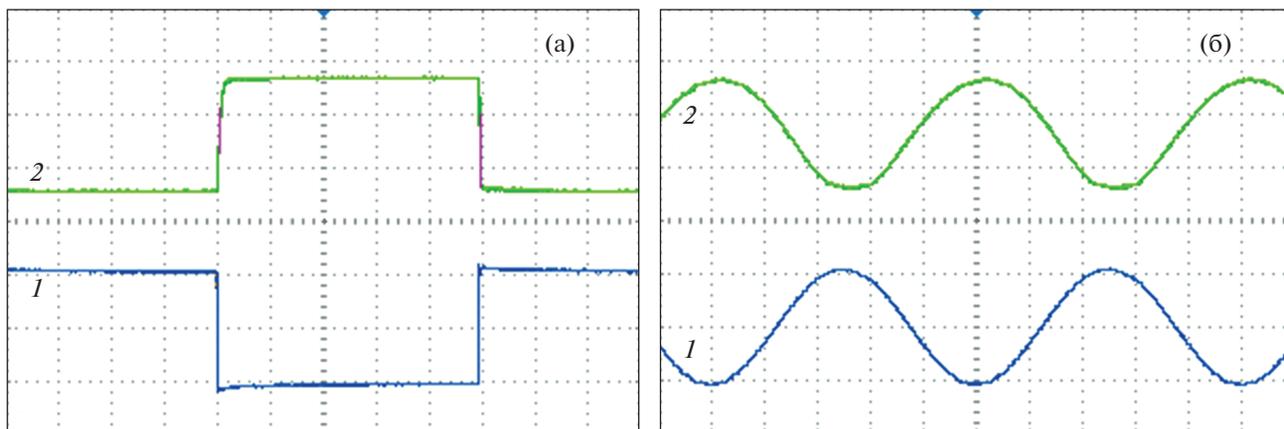


Рис. 5. Осциллограммы импульсов на сетке (1) и аноде (2) лампы ГИ-7Б при $R_c = 20$ кОм в отсутствие емкости нагрузки. Масштаб по вертикали: 1 – 10 В/деление, 2 – 500 В/деление, по горизонтали: а – 10 мкс/деление, б – 2 мкс/деление.

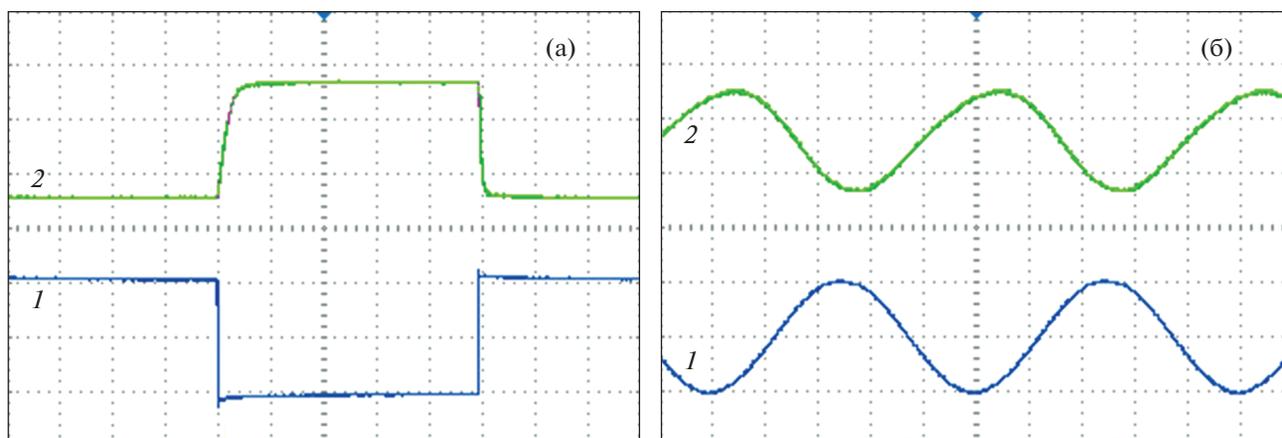


Рис. 6. Осциллограммы импульсов на сетке (1) и аноде (2) лампы ГИ-7Б при $R_6 = 20$ кОм и емкости 100 пФ, подключенной параллельно. Масштаб по вертикали: 1 – 10 В/деление, 2 – 500 В/деление, горизонтали: а – 10 мкс/деление, б – 2 мкс/деление.

Осциллограммы входного и выходного сигналов модуля управления, полученные на экспериментальном макете, приведены на рис. 4. Осциллограмма 1 – входной сигнал амплитудой 7 В. На выходе схемы получен разнополярный сигнал, изменяющийся от -10 до $+10$ В за время < 2 мкс (осциллограмма 2).

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов на сетке лампы ГИ-7Б (осциллограмма 1) и на ее аноде (осциллограмма 2) при $R_6 = 20$ кОм и отсутствии емкости нагрузки. На рис. 5а сигналы имеют прямоугольную форму, на рис. 5б – синусоидальную форму с частотой 100 кГц.

На рис. 6 приведены аналогичные осциллограммы с подключенной параллельно нагрузке емкостью 100 пФ, имитирующей паразитную емкость анода гиротрона относительно земли. Из приведенных осциллограмм видно, что наличие паразитной емкости приводит к незначительным искажениям выходных сигналов анодного напряжения, представляющимся несущественными для решения данной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан на эквиваленте нагрузки блок быстрого управления анодным напряжением гиротрона. Устройство позволяет изменять напряжение на изолированном аноде гиротрона, имеющем емкость относительно земли 100–200 пФ, в пределах от 0.4 до 1.6 кВ за время < 5 мкс пропорционально управляющему сигналу от 0 до $+10$ В. Полученные характеристики позволяют использовать разработанное устройство в цепи обратной связи системы ф.а.п.ч. для стабилизации выходной частоты гиротрона, используя сигнал фазового детектора в качестве управляющего.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-79-30071.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The year of the gyrotron // ITER Newline 21.04.2020. URL: <https://www.iter.org/newline/-/2931>
2. Darbos C., Ferran A., Bonicelli T., Carannante G., Cavinato M., Cismondi F., Denisov G., Farina D., Gagliardi M., Gandini F., Gassmann T., Goodman T., Hanson G., Henderson M.A., Kajiwara K. et al. // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2016. V. 37. Issue 1. P. 4. <https://doi.org/10.1007/s10762-015-0211-3>
3. Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // J. Instrumentation. 2012. V. 7. Article number P10010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10010>
4. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 98. Issue 11. P. 3518. <https://doi.org/10.1111/jace.13809>
5. Nanni E.A., Huang W.R., Hong K.-H., Ravi K., Fallahi A., Moriema G., Miller R.J. Dwayne, Kärtner F.X. // Nat. Commun. 2015. V. 6(1). Article number 8486. <https://doi.org/10.1038/ncomms9486>
6. Saito T., Yamaguchi Y., Tatematsu Y., Fukunari M., Hirobe T., Tanaka S., Shinbayashi R., Shimozuma T., Kubo S., Tanaka K., Nishiura M. // Plasma Fus. Res. Rapid Commun. 2017. V. 12. P. 1206013. <https://doi.org/10.1585/pfr.12.1206013>
7. Denisov G.G., Kuftin A.N., Manuilov V.N., Zavolsky N.A., Chirkov A.V., Soluyanov E.A., Tai E.M., Bakulin M.I., Tsvetkov A.I., Fokin A.P., Novozhilova Yu.V., Movshevich B.Z., Glyavin M.Yu. // Microw. Opt. Technol. Lett. 2020. V. 62. Issue 6. P. 2137. <https://doi.org/10.1002/mop.32330>

8. Müller G., Erckmann V., Thumm M., Wilhelm R., Dorst D., Melkus W. // Proc. 13th Symp. on Fusion Technology (SOFT). Varese. 1984. V. 2. P. 811.
9. Fernandez A., Glyavin M., Martin R., Novozhilova J., Ofitserov M., Petelin M.I. // 4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. 2003, Seoul, South Korea. 2003. P. 172.
<https://doi.org/10.1109/IVEC.2003.1286213>
10. Idehara T., Khutoryan E.M., Ogawa I., Matsuki Y., Fujiwara T. // Terahertz Science and Technology. 2016. V. 9. № 4. P. 117.
<https://doi.org/10.11906/TST.117-130.2016.12.12>
11. Fokin A., Tsvetkov A., Manuilov V., Sedov A., Bozhkov V., Genneberg V., Movshevich B., Glyavin M. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. Issue 12. P. 24705.
<https://doi.org/10.1063/1.5132831>
12. Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., Lubyako L., Morozkin M., Movshevich B., Tsvetkov A., Denisov G. // Scientific Reports. 2018. № 8. Article Number 4317.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1>