

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.21>

УДК 537.86+621.385.6

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХМОЩНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В СИСТЕМАХ СТРЕТЧЕР-УСИЛИТЕЛЬ-КОМПРЕССОР

Л. А. Юровский, И. В. Зотова, Э. Б. Абубакиров, Р. М. Розенталь,
А. С. Сергеев, Н. С. Гинзбург

Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2020 г.

Аннотация. Теоретически исследована возможность формирования сверхмощных ультракоротких СВЧ импульсов методом Chirped-Pulse Amplification (CPA), широко используемым в физике лазеров. Метод основан на предварительном растяжении начального импульса в стретчере, последовательном по времени усилении спектральных компонент в широкополосном усилителе и заключительном сжатии в линии с отрицательной дисперсией (компрессоре). Рассмотрены схемы, в которых в качестве диспергирующих элементов (стретчера и компрессора) используются волноводы с многозаходной винтовой гофрировкой, а в качестве усилителя – релятивистская черенковская ЛБВ или винтовая гиро-ЛБВ. Для параметров экспериментально реализованных усилителей диапазона 30 ГГц показано, что пиковая мощность импульсов в системах «стретчер-усилитель-компрессор» существенно превосходит не только уровень насыщения усилителя, но и более чем в 4 раза мощность запитывающего электронного пучка.

Ключевые слова: ультракороткие микроволновые импульсы, компрессия усиленных чирпированных импульсов, винтовая гиро-ЛБВ, релятивистский черенковский усилитель.

Abstract. We theoretically investigate the possibility of generating ultra-high-power ultrashort microwave pulses based on the Chirped-Pulse Amplification (CPA) method, which is widely used in laser physics. This method includes preliminary elongation of the initial pulse in a stretcher, sequential amplification of spectral

components in a broadband amplifier, and compression in a line with negative dispersion (compressor). We consider the scheme in which waveguides with multi-fold helical corrugation are used as dispersing elements (stretcher and compressor), and a relativistic Cherenkov TWT or helical gyro-TWT is used as an amplifier. For the parameters of experimentally realized amplifiers in the 30 GHz range, we show that the peak pulse power in the stretcher-amplifier-compressor system significantly exceeds not only the saturation level of the amplifier, but also more than 4 times higher than the power of the used electron beam.

Key words: ultrashort microwave pulses, compression of amplified chirped pulses, helical gyro-TWT, relativistic Cherenkov amplifier.

Введение

В настоящее время лазерные импульсы с рекордно высокой пиковой мощностью формируются на основе метода усиления «чирпированных» (частотно модулированных) импульсов (Chirped Pulse Amplification, CPA) [1,2]. Данный метод включает в себя три этапа. На первом – исходный короткий импульс проходит через «стретчер» – диспергирующую линию, на выходе из которой формируется растянутый по времени сигнал с малой мощностью и плавно меняющейся частотой. На втором этапе осуществляется последовательное усиление различных спектральных компонент полученного импульса в одном или нескольких усилителях. На заключительном этапе происходит восстановление исходной формы импульса в компрессоре – линии с отрицательной (по отношению к стретчеру) дисперсией. Перенесение CPA-метода в микроволновый диапазон позволило бы осуществить генерацию электромагнитных импульсов ультравысокой (от мультимегаваттной до мультигигаваттной) мощности, что представляет интерес для ускорительных приложений, систем электронного противодействия, а также для диагностики плазмы и твердого тела.

Очевидно, что CPA-метод формирования сверхмощных импульсов СВЧ-диапазона является достаточно универсальным и для его реализации может

быть использован широкий класс электронных усилителей. В данной работе рассматривается возможность использования giro-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности [3,4] для получения импульсов мультимегаваттной мощности. При соответствующем выборе параметров одна из нормальных мод такого волновода имеет достаточно большую и практически постоянную групповую скорость в широкой (10-20%) полосе частот, что позволяет во всей этой области обеспечить эффективное резонансное взаимодействие волны с винтовым электронным пучком. Вследствие этого рассматриваемая giro-ЛБВ обеспечивает эффективное усиление ультракоротких электромагнитных импульсов с широким спектром. Для достижения мультигигаваттного уровня мощности предлагается использовать релятивистскую черенковскую ЛБВ с увеличенным радиусом волновода [5,6], позволяющим избежать развития вакуумного пробоя при достижении высокого уровня мощности.

Использование эффективных стретчера и компрессора является важной частью CPA-метода. Увеличение длительности растянутого импульса позволяет повысить количество получаемой в усилителе энергии, а снижение пиковой мощности – избежать развития нежелательных нелинейных эффектов. В тоже время повышение эффективности компрессора позволяет увеличить пиковую мощность на выходе из системы. В связи с этим в качестве диспергирующих элементов рассматриваются волноводы с многозаходной спиральной гофрировкой стенок, которые обладают способностью изменять свои диспергирующие свойства в широком диапазоне, при варьировании геометрических параметров. Дополнительным преимуществом рассматриваемых волноводов является отсутствие полосы непропускания в рабочем диапазоне частот, что позволяет избежать отражения от дисперсионных элементов и возникающей при этом паразитной генерации в усилителе и нарушения работы задающего генератора исходных импульсов.

1. Модель и основные уравнения

Рассмотрим систему «стретчер – усилитель – компрессор» (Рис. 1), в которой в качестве диспергирующих элементов используются волноводы с многозаходной винтовой гофрировкой стенок: $r(\varphi, z) = r_0 + \tilde{r} \cos(\bar{m}\varphi - \bar{h}z)$, где r_0 – средний радиус волновода, \bar{m} – число заходов, $\bar{h} = 2\pi/d$, \tilde{r} и d – амплитуда и период гофрировки. В условиях брэгговского резонанса: $\bar{m} = m_A + m_B$, $\bar{h} \approx h_B$, такая гофрировка обеспечивает связь и взаимное рассеяние двух противоположно вращающихся $TE_{m,n}$ мод цилиндрического волновода [7], первая из которых является квазикритической (A), а вторая – бегущей (B).

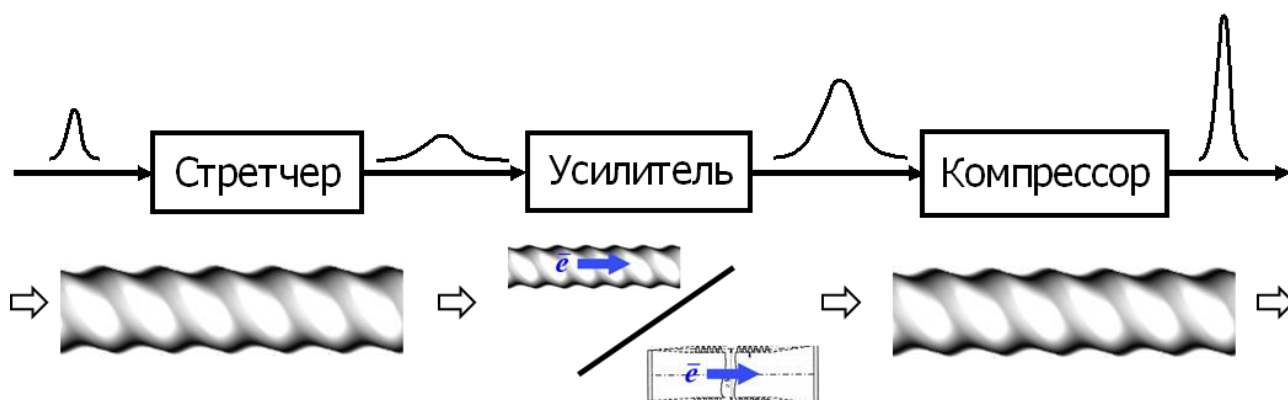


Рис.1. Принципиальная схема реализации системы «стретчер – усилитель – компрессор» со спирально гофрированными волноводами в качестве дисперсионных элементов и различными типами усилителей.

Процесс распространения импульса в стретчере и компрессоре может быть описан при помощи системы эволюционных уравнений [8]:

$$\frac{\partial^2 a}{\partial z^2} - 2i \frac{\kappa_A}{c} \frac{\partial a}{\partial t} = 2\sigma \kappa_A^2 b, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{gr}} \frac{\partial}{\partial t} \right) b - i(\bar{h} - h_0)b = i \frac{\kappa_A^2}{h_0} \sigma a. \quad (2)$$

Здесь $a = eA\sqrt{N_A}/mc^2\kappa_A$ и $b = eB\sqrt{N_B}/mc^2\kappa_B$ – нормированные амплитуды парциальных волн, $\sigma = \tilde{r}(v_B^2 - m_A m_B) / 2r_0 \sqrt{(v_A^2 - m_A^2)(v_B^2 - m_B^2)}$ – параметр

связи волн на гофрированной поверхности волновода, $N_{A,B} = (v_{A,B}^2 - m_{A,B}^2) J_{m_{A,B}}^2(v_{A,B})$ – нормы парциальных волн, J_m – функция Бесселя m -го порядка, $v_{A,B} = \kappa_{A,B} r_0$ – корни уравнений $J'_{m_A}(v_A) = J'_{m_B}(v_B) = 0$, $V_{gr} = h_0 c / \kappa_A$ – групповая скорость бегущей волны B , $\kappa_A = \omega_A / c$.

Предварительный подбор геометрических параметров волноводов с многозаходной гофрировкой был выполнен на основе анализа дисперсионных характеристик нормальной волны W , дисперсионное уравнение для которой может быть получено из системы уравнений (1)-(2) при записи амплитуд парциальных волн в форме $a, b \sim \exp(i\omega t - ihz)$:

$$\left(\omega - \omega_A - \frac{h^2 c^2}{2\omega_A} \right) \left(\omega - \omega_A - V_{gr} (h + \bar{h} + h_0) \right) = \sigma^2 \omega_A^2. \quad (3)$$

При этом для согласования дисперсионных характеристик стретчера и компрессора можно использовать кинематический подход, который заключается в представлении входного импульса в виде набора «частиц», имеющих скорости, равные групповым скоростям спектральных компонент в диспергирующей линии $V_{gr}(\omega) = (dh/d\omega)^{-1}$. В этом случае эволюция плоской волны $u(z, t) = U(z, t) \exp(i\omega t - ih(\omega)z)$ в линейной диспергирующей среде может быть представлена в виде:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int u_0(t') \exp[i\omega(t - t') - i\psi(\omega)] dt' d\omega \quad (4)$$

где $u_0(t) = u(z = 0, t)$ – входной сигнал, $\psi(\omega) = h_{str}(\omega)L_{str} + h_{com}(\omega)L_{com}$ – суммарный набег фазы, L_{str} и L_{com} – длины стретчера и компрессора, соответственно, $h_{str}(\omega)$ и $h_{com}(\omega)$ – их дисперсионные характеристики, определяемые соотношением (3). Восстановление формы сигнала при прохождении через систему «стретчер-компрессор» эквивалентно выполнению соотношения: $\psi(\omega) = \tau_d \omega + \alpha$, где время задержки τ_d представляет собой время прохода импульса по системе. В рамках кинематического подхода параметры

стретчера подбирались таким образом, чтобы «частицы» разбегались с наибольшей скоростью, обеспечивая эффективное растяжение сигнала, в то время как, параметры компрессора выбирались из условия линейности набега фаз $\psi(\omega)$ [8].

2. Численное моделирование системы с винтовой гиро-ЛБВ

Численное моделирование системы «стретчер – усилитель - компрессор» со спирально гофрированной гиро-ЛБВ в качестве усилителя проводилось на основе системы эволюционных уравнений (3), которая в случае усилителя дополнялась соответствующими уравнениями движения электронов [8]. Расчеты проводились для исходного импульса с центральной частотой, близкой к 30 ГГц, пиковой мощностью 3 кВт и длительностью 200 пс (ширина спектра $\sim 10\%$, что позволяет избежать искажений на краях полосы усиления). Параметры усилителя были выбраны соответствующими экспериментально реализованной 30-ГГц гиро-ЛБВ [4], в которой трехзаходная винтовая гофрировка связывает бегущую $TE_{1,1}$ и квазикритическую $TE_{2,1}$ моды невозмущенного цилиндрического волновода. Для параметров электронного пучка: энергия - 68 кэВ, ток - 10 А и питч-фактор 1.2, для значения ведущего магнитного поля $H_0=6.1$ кЭ при взаимодействии на второй циклотронной гармонике обеспечивается режим касания в полосе $\sim 15\%$ при следующих параметрах гофрировки: $r_0=3.56$ мм, $d=7.36$ мм, $\tilde{r}=1.47$ мм. В качестве стретчера и компрессора рассматривались волноводы с пятизаходной спиральной гофрировкой, связывающей бегущую $TE_{3,1}$ и квазикритическую $TE_{2,2}$ моды и увеличенным средним радиусом r_0 , позволяющим снизить суммарные омические потери.

Численное моделирование показало, что после прохождения стретчера длиной 100 см со следующими параметрами гофрировки: $r_0=8.9$ мм, $d=8.93$ мм, $\tilde{r}=2.02$ мм, начальный импульс растягивается в 23 раза до 4.6 нс, а пиковая мощность уменьшается в 30 раз (Рис. 2.а). В усилителе с мощностью пучка 700 кВт пиковая мощность импульса увеличивается до 230 кВт, а его длительность – до 7.1 нс (Рис. 2.б).

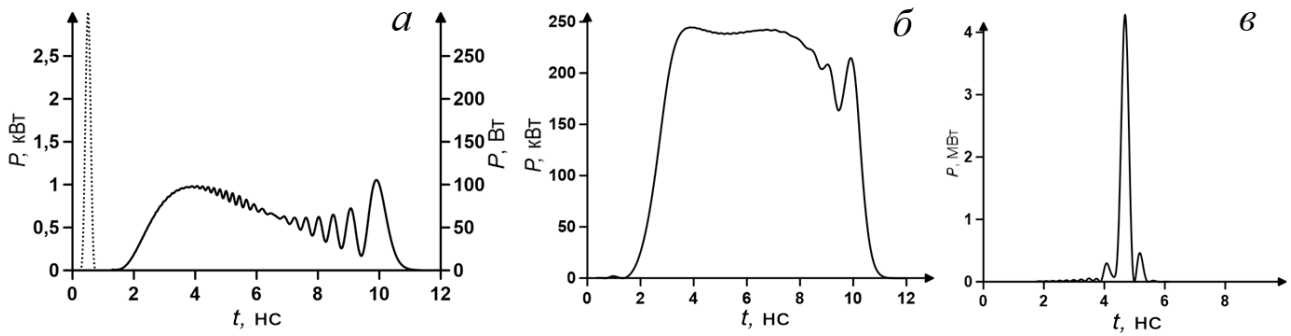


Рис. 2 Результаты численного моделирования системы с винтовой гиро-ЛБВ. Временная зависимость мощности излучения на входе в систему (пунктирная кривая) и на выходе соответствующих секций: а) стретчер; б) усилитель; в) компрессор.

Увеличение длительности импульса и некоторое искажение его формы обусловлено нелинейным режимом работы усилителя, который оказывается более оптимальным по сравнению с линейным режимом, в котором форма сигнала сохраняется. Согласно результатам моделирования (Рис.2.в), после прохождения через компрессор длиной 100 см со следующими параметрами гофрировки: $r_0=8.41$ мм, $d=6.82$ мм, $\tilde{r}=4.05$ мм, происходит восстановление первоначальной формы импульса. При этом пиковая мощность выходного сигнала с длительностью ~ 260 пс составляет $P \approx 4$ МВт. Таким образом коэффициент конверсии данной системы – отношение пиковой мощности полученного импульса к мощности используемого электронного пучка, достигает 6.

3. Численное моделирование системы с релятивистской черенковской ЛБВ

Численное моделирование системы «стретчер – усилитель - компрессор» с релятивистской черенковской ЛБВ в качестве усилителя проводилось с применением спектрального подхода, использующего уравнение (5) для описания растяжения и сжатия импульса при проходе через диспергирующие элементы. Аналогично системе с винтовой гиро-ЛБВ в качестве стретчера и компрессора рассматриваются волноводы с пятизаходной спиральной гофрировкой поверхности. Однако, при использовании релятивистского усилителя выбор волноводов с увеличенным средним радиусом объясняется не только уменьшением омических потерь, но и понижением вероятности

развития пробоя. Данный факт особо важен в компрессоре, где пиковое значение мощности импульса может достигать нескольких гигаватт.

Моделирование релятивистской черенковской ЛБВ с замедляющей системой, выполненной в виде цилиндрического волновода с периодической гофрировкой проводилось с использованием стационарной одномерной модели [9], описывающей взаимодействие рабочей $TM_{0,1}$ моды с электронным пучком со следующими параметрами: энергия электронов – 500 КэВ, ток – 4 А. Параметры замедляющей системы: период синусоидальной гофрировки - 2,30 мм, максимальный радиус волновода – 8,97 мм, минимальный радиус волновода – 6,45 мм, соответствуют описанным в [5]. Импеданс связи цилиндрического электронного пучка радиусом 5.2 мм с волной составил 1.1 Ом. Результаты моделирования показали возможность достижения при оптимальной длине замедляющей системы, равной 74 мм, КПД более 30% при рабочей полосе частот около 3 ГГц.

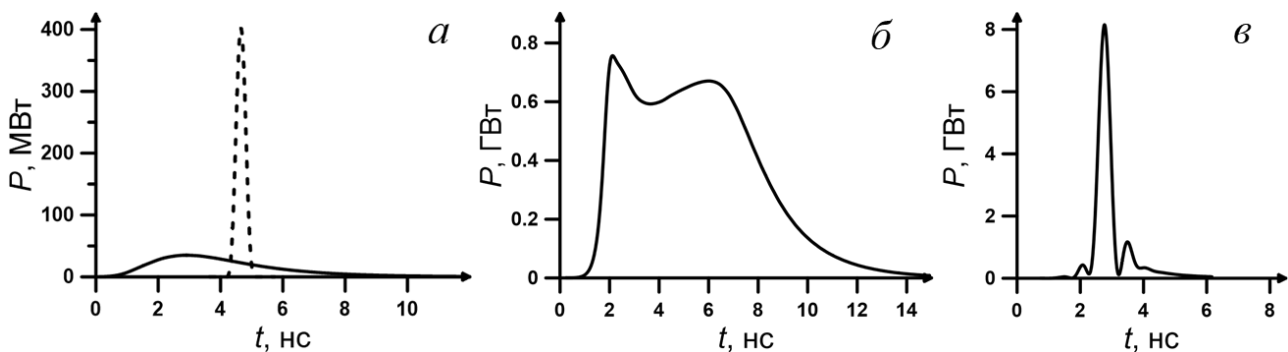


Рис. 3 Результаты численного моделирования системы с релятивистской черенковской ЛБВ. Временная зависимость мощности излучения на входе в систему (пунктирная кривая) и на выходе соответствующих секций: а) стретчер; б) усилитель; в) компрессор.

В качестве исходного сигнала на входе в систему «стретчер – усилитель – компрессор» рассматривался импульс сверхизлучения на частоте 30 ГГц, длительностью 360 пс и мощностью 400 МВт [10,11]. Численное моделирование прохождения данного импульса через стретчер длиной 100 см проводилось для следующих параметров спирально гофрированного волновода: $r_0=10.7$ мм, $d=9.2$ мм, $\tilde{r}=2.5$ мм. Результаты расчетов показывают, что

исходный импульс растягивается примерно в 10 раз, а пиковая мощность уменьшается в 11 раз (Рис. 3.а). В усилителе с мощностью пучка 2 ГВт, пиковая мощность растянутого импульса увеличивается до 600 МВт, а его длительность – до 6 нс (Рис. 3.б). Таким образом непосредственное усиление рассматриваемого импульса сверхизлучения мощностью 400 МВт в данном усилителе невозможно. Согласно результатам расчетов (Рис.3.в), после прохождения через компрессор длиной 100 см с параметрами спирально гофрированного волновода: $r_0=9.4$ мм, $d=8.8$ мм, $\tilde{r}=2.5$ мм, происходит восстановление первоначальной формы импульса. При этом пиковая мощность выходного сигнала с длительностью ~ 460 пс составляет $P \approx 8$ ГВт. Таким образом, коэффициент конверсии данной системы достигает 4.

Заключение

Таким образом, мы продемонстрировали принципиальную возможность применения метода СРА в микроволновом диапазоне частот с использованием волноводов с многозаходной спиральной гофрировкой поверхности в качестве стретчера и компрессора. Показано, что при использовании широкополосной винтовой гиро-ЛБВ в качестве усилителя данный метод позволяет формировать ультракороткие импульсы мультимегаваттного уровня мощности. При использовании релятивистского черенковского усилителя метод позволяет усиливать короткие импульсы до уровня порядка десяти гигаватт. Отметим также, что в отличие от других методов генерации мощных ультракоротких импульсов, схема «стретчер-усилитель-компрессор» выглядит более перспективной, поскольку позволяет достигать уровней мощности, существенно превышающих мощность запитываемого электронного пучка.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 18-08-00717, а также частично в рамках госзадания (номер темы 0035-2019-0001).

Литература

1. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. // Optics Communications. 1998. Vol.56. No.3. P.219-221. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8)
2. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A. and Yakovlev I.V. Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals. // Laser Physics Letters. 2007. Vol.4. No.6. P.421-427. <https://doi.org/10.1002/lapl.200710008>
3. Bratman V.L., Cross A.W., Denisov G.G., He W., Phelps A.D.R., Ronald K., Samsonov S.V., Whyte C.G., Young A.R. High-Gain Wide-Band Gyrotron Traveling Wave Amplifier with a Helically Corrugated Waveguide. // Physical Review Letters. 2000. Vol.84. No.12. P.2746-2749. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2746>
4. Samsonov S.V., Gachev I.G., Denisov G.G., Bogdashov A.A., Mishakin S.V., Fiks A.S., Soluyanov E.A., Tai E.M., Dominyuk Y.V., Levitan B.A., Murzin V.N. Ka-Band Gyrotron Traveling-Wave Tubes With the Highest Continuous-Wave and Average Power. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol.61. No.12, P.4264-4267. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2364623>
5. Abubakirov E.B., Konyushkov A.P., Leontyev A.N., Rozental R.M., Tarakanov V.P. Multi-pass relativistic traveling-wave tube with simultaneous operation on symmetric and asymmetric modes. // Physics of Plasmas. 2020. Vol.27. No.7. P.073104-1/6. <https://doi.org/10.1063/5.0006181>
6. Shiffer D., Nation J.A., Kerslick G.S. A high-power traveling wave tube amplifier. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1990. Vol.18. No.3. P.546-552. <https://doi.org/10.1109/27.55926>
7. Cooke S.J., Denisov G.G. Linear theory of a wide-band gyro-TWT amplifier using spiral waveguide. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1998. Vol.26. No.3. P.519–530. <https://doi.org/10.1109/27.700786>

8. Гинзбург Н.С., Юровский Л.А., Вилков М.Н, Зотова И.В., Сергеев А.С., Самсонов С.В., Яковлев И.В. Растяжение, усиление и компрессия микроволновых импульсов с использованием спирально гофрированных волноводов. // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т.62. №7. С.528–538. <https://doi.org/10.1007/s11141-020-09993-z>
9. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuks M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Schamiloglu E., Soluyanov E.I., and Yastrebov V.V. An X-band gigawatt amplifier. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol.30. No.3. P.1041-1052. <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.801601>
10. Ginzburg N.S., Novozhilova Yu.V., Sergeev A.S., Peskov N.Yu., Zotova I.V., Phelps A.D.R., Cross A.W., Wiggins S.M., He W., Ronald K., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Tarakanov V.P. Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime. // Physical Review E. 1999. Vol.60. No.3. P.3297-3304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.3297>
11. Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam. // Physical Review E. 2006. Vol.74. No.1. P.016501-1/8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.016501>

Для цитирования:

Юровский Л.А., Зотова И.В., Абубакиров Э.Б., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Гинзбург Н.С. Формирование сверхмощных микроволновых импульсов в системах стретчер-усилитель-компрессор. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.21>