

**М. В. Мальцева^{1,2}, В. М. Павлов¹, С. Л. Самойлов¹
А. В. Андрианов^{1,2}, И. Л. Пивоваров¹**

¹ *Институт ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

a.v.andrianov@inp.nsk.su

ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ СИСТЕМЫ УМНОЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ТИПА SLED

Система умножения мощности представляет собой набор высокочастотных резонаторов, предназначенных для запасания энергии электромагнитного поля. Данная система позволяет увеличить пиковую мощность в системе, тем самым увеличивая амплитуду ускоряющего поля. В работе приводится описание конструкции системы умножения мощности и принцип ее работы. Проведены измерения электромагнитных характеристик изготовленных резонаторов, а также огибающей отраженного импульса мощности и коэффициента усиления системы. На основе полученных данных проведен анализ работы ускоряющей секции на основе диафрагмированного волновода, возбуждаемой системой умножения мощности SLED.

Ключевые слова: SLED, СВЧ резонаторы, система умножения мощности, ускоряющая структура, ускоритель.

Введение

В Институте ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН успешно работает инжекционный комплекс [1]. Он состоит из линейного электрон-позитронного ускорителя и кольца накопителя. В состав ускорителя входит 14 ускоряющих секций и 4 клистрона с выходной мощностью около 60 МВт. Каждая ускоряющая секция представляет собой диафрагмированный волновод с постоянным импедансом [2].

Каждый клистрон обеспечивает СВЧ импульсы длительностью 3,5 мкс. В течение 3 мкс мощность запасается в резонаторах системы SLED (SLAC Energy Development)

[3], после чего происходит переверт фазы волны генератора. В последующие 0,5 мкс мощность, усиленная резонаторами системы SLED, поступает в ускоряющие структуры.

Несмотря на то что данная система умножения мощности давно и успешно работает, в целях подготовки стенда для отработки элементов проекта по созданию с-т фабрики¹, необходимо создать ускоряющий модуль из четырех ускоряющих секций, системы умножения мощности типа SLED и одного клистрона с равным распределением входных мощностей между ускоряющими структурами. В связи с этим были изготовлены два резонатора системы умножения мощности типа SLED.

* Работа поддержана госзадаанием № 0305-2016-0008 «Разработка ускоряющего модуля на 200 MeV».

¹ http://www.inp.nsk.su/news/rss/2012_83_superC.pdf

В данной работе приводятся описание работы системы умножения мощности типа SLED, измерения параметров резонаторов системы, а также переходного процесса в системе связанных резонаторов. На основе полученных параметров рассчитаны распределение ускоряющего поля в ускоряющей структуре (УС) и энергия частиц.

Система умножения мощности SLED. Принцип работы

Система умножения мощности типа SLED состоит из волноводного трехдецибельного целевого моста и двух высокодобротных цилиндрических резонаторов (рис. 1) [3]. Диаметр резонатора $D = 196$ мм, высота $H =$

$= 346,9$ мм. В качестве рабочей моды колебания выбрана мода H_{015} , поскольку она имеет на рабочей частоте 2855 МГц наибольшую собственную добротность резонаторов порядка $Q_0 \approx 100000$. При этом на данной частоте существует также дополнительная мода колебания E_{115} с добротностью порядка $Q_0 \approx 50000$. Для снятия вырождения резонатор сделан не полностью цилиндрическим (см. рис. 1). За счет такого изменения формы изменяется емкость резонатора на моде колебания E_{115} , что приводит к изменению ее резонансной частоты. Кроме этого, ввод мощности осуществляется через отверстие связи, смещенное относительно центра резонатора, что также способствует снятию вырождения. На рис. 2 показаны силовые линии полей для моды колебания H_{015} .

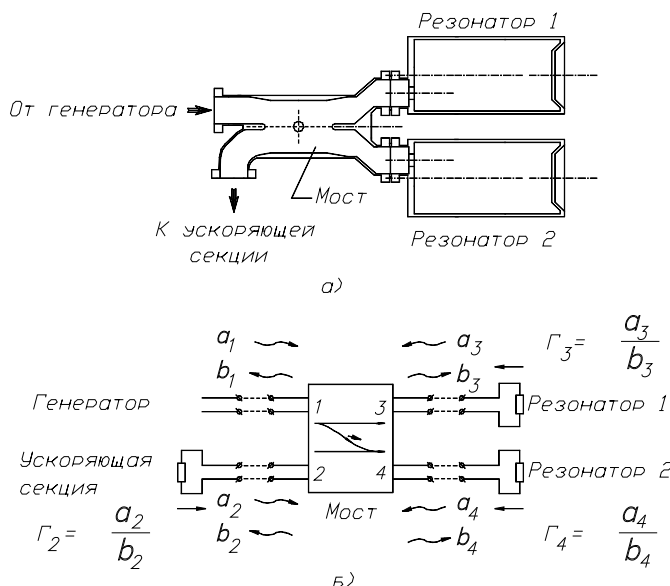


Рис. 1. Система умножения мощности SLED

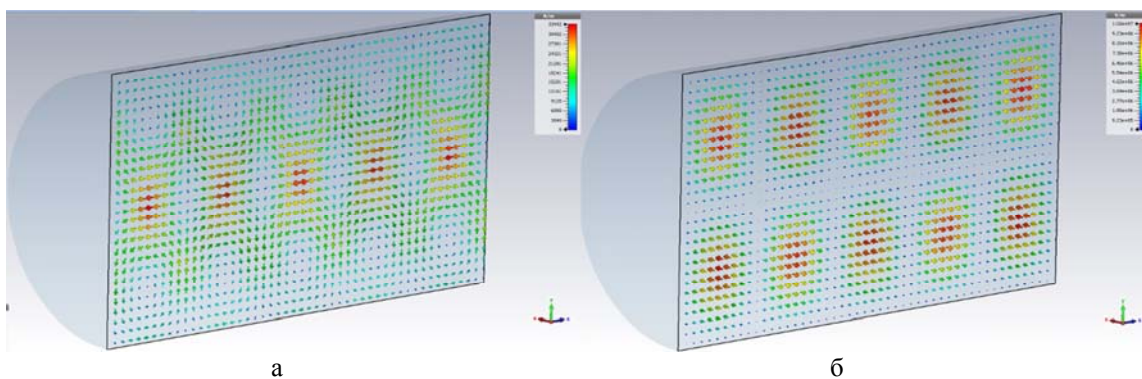


Рис. 2. Мода колебания H_{015} резонатора системы SLED: а – магнитное поле, б – электрическое поле

Волноводный трехдецибильный мост представляет собой направленный ответвитель первого рода. В стационарном режиме амплитуды отраженных от него волн $\vec{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4)^T$ связаны с амплитудами падающих волн $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4)^T$ матрицей рассеяния S [4]

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = S \cdot \vec{a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -i \\ 0 & 0 & -i & 1 \\ 1 & -i & 0 & 0 \\ -i & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Кроме того, при известных коэффициентах отражения от входов резонатора Γ_2 , Γ_3 и Γ_4 имеем

$$\begin{pmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Решая совместно (1) и (2), можно выразить все амплитуды отраженных волн через амплитуду падающей волны a_1 :

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{a_1}{2} \cdot \frac{\Gamma_3 - \Gamma_4 - 2\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4}{1 + \frac{\Gamma_2}{2}(\Gamma_3 - \Gamma_4)}, \quad a_1 - \text{задано,} \\ b_2 &= \frac{i \cdot a_1}{2} \cdot \frac{\Gamma_3 + \Gamma_4}{1 + \frac{\Gamma_2}{2}(\Gamma_3 - \Gamma_4)}, \quad a_2 = b_2\Gamma_2, \\ b_3 &= \frac{a_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 - \Gamma_2\Gamma_4}{1 + \frac{\Gamma_2}{2}(\Gamma_3 - \Gamma_4)}, \quad a_3 = b_3\Gamma_3, \quad (3) \\ b_4 &= \frac{i \cdot a_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 + \Gamma_2\Gamma_4}{1 + \frac{\Gamma_2}{2}(\Gamma_3 - \Gamma_4)}, \quad a_4 = b_4\Gamma_4. \end{aligned}$$

Γ_3 и Γ_4 – коэффициенты отражения от резонаторов, Γ_2 – коэффициент отражения от ускоряющей структуры.

В случае идеального согласования УС с подводящим трактом $\Gamma_2 = 0$ и при использовании одинаковых резонаторов ($\Gamma_3 = \Gamma_4 = \Gamma_0$) получим

$$\begin{aligned} b_1 &= 0, \\ b_2 &= -i \cdot a_1 \cdot \Gamma_0, \quad a_2 = 0, \\ b_3 &= \frac{a_1}{\sqrt{2}}, \quad a_3 = \frac{a_1}{\sqrt{2}}\Gamma_0, \\ b_4 &= -\frac{i \cdot a_1}{\sqrt{2}}, \quad a_4 = -\frac{i \cdot a_1}{\sqrt{2}}\Gamma_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Иначе говоря, отраженная в генератор волна отсутствует, а в ускоряющую секцию поступает волна амплитудой, равной амплитуде отраженной волны в случае одного резонатора. Поэтому принцип умножения мощности можно рассмотреть на примере переходного процесса, происходящего в одном резонаторе.

На резонансной частоте закон сохранения энергии для резонатора умножителя мощности можно записать следующим образом:

$$P_z = P_{omp} + P_{nom} + \frac{dW}{dt}. \quad (5)$$

где P_z, P_{omp} – поступающая от генератора и отраженная мощности соответственно, P_{nom} – мощность потерь в стенках резонатора, W – запасенная в резонаторе энергия. По определению $P_{nom} = \frac{P_{изл}}{\beta}$, где $P_{изл}$ – излучаемая мощность, β – коэффициент связи резонатора. Мощность, распространяющаяся по волноводу, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Подставляя $P_z = k \cdot E_z^2$, $P_{omp} = k \cdot (E_{изл} - E_z)^2$ и $P_{изл} = k \cdot E_{изл}^2$ в выражение (5), получим

$$E_z^2 = (E_{изл} - E_z)^2 + \frac{E_{изл}^2}{\beta} + \frac{2Q_0}{\omega_0\beta} E_{изл} \frac{dE_{изл}}{dt}. \quad (6)$$

Если ввести постоянную времени резонатора $\tau_0 = \frac{2Q_0}{\omega_0}$ и нагруженную постоянную времени $T_c = \frac{\tau_0}{1 + \beta}$, то, преобразовав (6), можно прийти к следующему уравнению:

$$\frac{dE_{изл}}{dt} = -\frac{1}{T_c} E_{изл} + \frac{2\beta}{\tau_0} E_z. \quad (7)$$

Решая его относительно $E_2(t)$, получим выражение для амплитуды излучаемой и отраженной волны

$$E_{изл}(t) = \frac{2\beta}{\tau_0} e^{-t/\tau_c} \int_0^t E_2(\tau) \cdot e^{\tau/\tau_c} d\tau, \quad (8)$$

$$E_{omp}(t) = E_{изл}(t) - E_2(t) = -E_2(t) + \frac{2\beta}{\tau_0} e^{-t/\tau_c} \int_0^t E_2(\tau) \cdot e^{\tau/\tau_c} d\tau. \quad (9)$$

Пусть волна, поступающая от генератора, имеет вид $E_{nad0}(t) = E_{nad}(t) \cdot e^{i\omega t}$, а отраженная $E_{omp0}(t) = E_{omp}(t) \cdot e^{i\omega t}$, где ω – частота генератора. Рассмотрим случай, когда

$E_{nad}(t)$ – идеальная единичная ступенька. Тогда прямым вычислением (9) получаем для отраженной волны результат, который приводится на рис. 3. Из графиков видно, что в момент изменения амплитуды падающей волны с 1 до 0 отраженная волна скачком изменяется на +1. При $\beta > 0$ амплитуда отраженной волны уже больше амплитуды падающей волны, т. е. происходит увеличение мощности.

Если входной сигнал в момент времени t_1 испытывает еще и переворот фазы на 180° , то отраженная волна в этот момент изменит свою амплитуду уже на +2, как показано на рис. 4.

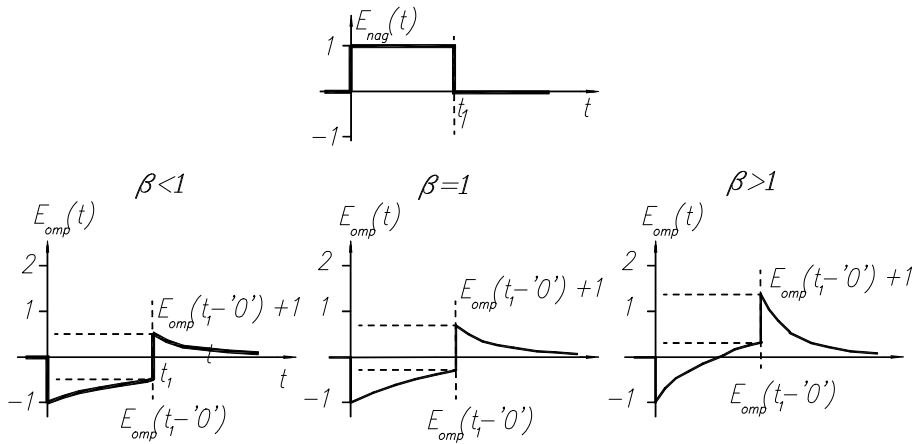


Рис. 3. Переходной процесс при подаче на резонатор единичного сигнала ступенчатой формы

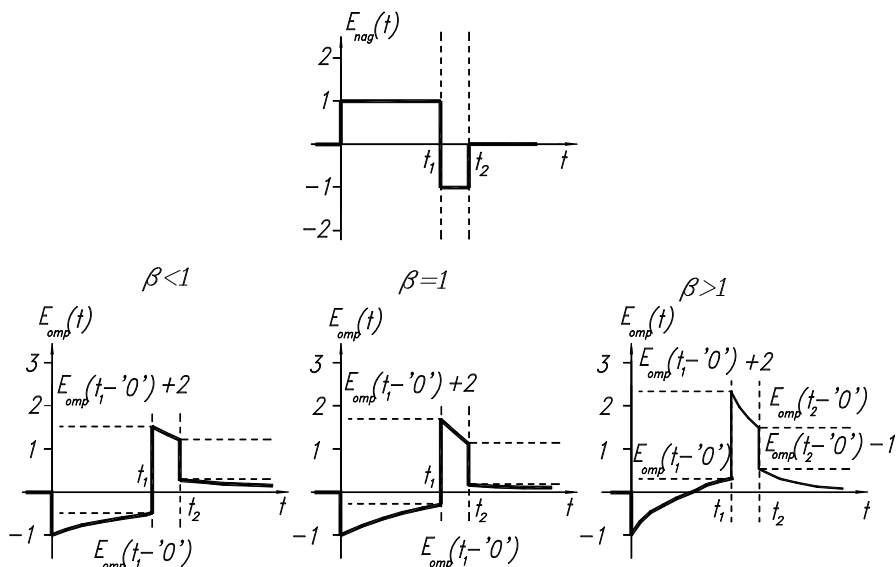


Рис. 4. Переходной процесс при изменении фазы сигнала на 180° в момент времени t_1

Для волны $E_{nad}(t)$, поступающей от генератора и изображенной на рис. 4, можно вычислить коэффициент усиления амплитуды волны

$$K_E = \frac{E_{\text{макс.опр.}}}{E_{\text{над.}}} = \frac{3\beta + 1}{\beta + 1} - \frac{2\beta}{\beta + 1} \cdot e^{-t_1/T_c}. \quad (10)$$

При $t_1 \rightarrow \infty$ и $\beta \rightarrow \infty$ $K_E = 3$, для усиления мощности $K_p = K_E^2 = 9$. Другими словами, в идеальном случае, сразу после переворота фазы на 180° , имеем девятикратное умножение мощности.

Измерения параметров резонатора системы умножения мощности SLED

На рис. 5 показаны два изготовленных резонатора системы SLED. Резонаторы имеют возможность подстройки частоты путем деформирования задней стенки, а также водяную стабилизацию температуры, что также позволяет производить дополнительную настройку частоты. Изменение частоты при использовании механической настройки составляет около 4 МГц/мм. Связь осуществляется с помощью круглого отверстия с диаметром 34 мм и толщиной 7 мм. Рядом с вводом мощности располагается дополнительное отверстие связи, которое может использоваться в процессе настройки для изучения прошедшего сигнала. Данное отверстие обеспечивает малую связь, не влияющую на распределение полей в резонаторах.



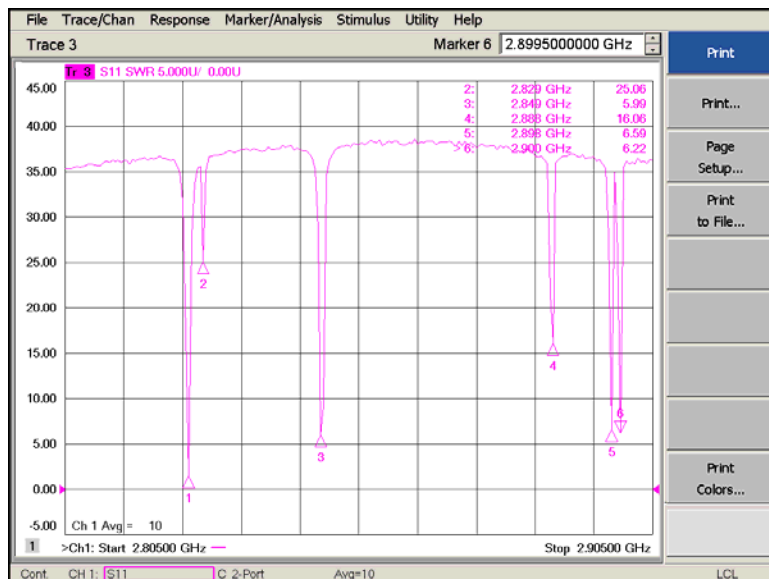
Рис. 5. Изготовленные резонаторы SLED

Изготовленные резонаторы являются идентичными. Отличие измеренных частот резонаторов составило менее 10 %, что компенсируется с помощью предусмотренной подстройки частоты. Коэффициенты связи также совпадают с точностью порядка 10 %, что является удовлетворительным показателем и не оказывает принципиального влияния на работу системы SLED. В связи с этим результаты измерений представлены для одного из резонаторов.

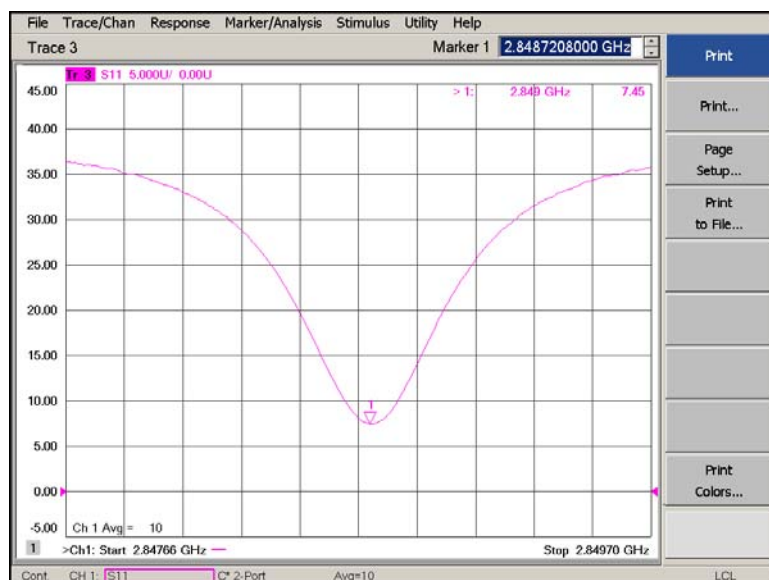
На рис. 6, а показан коэффициент стоячей волны (КСВ) резонатора, полученный с помощью измерителя S-параметров. Из измеренной зависимости была выбрана мода с максимальной собственной добротностью, которая составила $Q_0 = 80000$. Добротность резонатора определялась по «проходной» схеме коаксиальным зондом со слабой связью через дополнительное технологическое отверстие, описанное выше (см. рис. 5) [5]. Несмотря на то что реальное распределение поля на выбранной моде измерить не представляется возможным, считается, что данная мода является рабочей, поскольку обладает максимальной собственной добротностью. На рис. 6, б изображена зависимость КСВ от частоты для выбранной моды. Так как измерения проводятся в режиме пересвязи, то коэффициент связи β равен КСВ, $\beta = 7.4$. Нагруженная добротность $Q_L \approx 9500$, рабочая частота – $f_0 = 2848.7$ МГц.

На рис. 7 показан измеренный переходной процесс от резонатора без переворота фаз, а также приведено его сравнение с вычисленной зависимостью с учетом измеренных характеристик. Схема измерения показана на рис. 8. Измерения производились с помощью калиброванной детекторной головки (см. рис. 8). В качестве входного импульса использовался СВЧ сигнал с огибающей прямоугольной формы от генератора. Отличие измеренной максимальной излученной мощности от расчетной составляет 10 %. Данное отличие, в первую очередь, связано с особенностью поведения детекторной головки при работе с резкими фронтами импульсов.

Изготовленные резонаторы имеют диаметр 196 мм и высоту 346.9 мм. Измеренные параметры резонатора на моде H_{015} приведены в табл. 1. С помощью выражения (9) получена отраженная от системы SLED мощность, показанная на рис. 9, при исполь-



а



б

Рис. 6. Коэффициент стоячей волны резонатора SLED

зовании переворота фаз волны генератора на 180° в момент времени 3 мкс.

С использованием (10) вычислен коэффициент умножения по мощности $K_p = 7$.

Для ускоряющей структуры с постоянным импедансом, с учетом мощности генератора $P(z=0, t) = P_0 = \text{const}$, распределение мощности вдоль структуры будет выражаться [6]

$$P(z) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{2}{\tau_{0A}} \cdot \frac{z}{v_{гп}}\right) = P_0 \cdot \exp(-2 \alpha z), \quad (11)$$

а распределение ускоряющего электрического поля

$$E(z) = E_0 \cdot \exp(-\alpha z), \quad (12)$$

где $E_0 = \sqrt{2\alpha R_{sh} P_0}$. Энергию, набираемую частицей, можно найти из выражения (здесь энергия в электрон-вольтах)

$$U(z) = \int_0^z E(z) dz. \quad (13)$$

В выражениях (11)–(13) $v_{гп}$ – групповая скорость волны в ускоряющей структуре, α – коэффициент затухания, R_{sh} – шунтовое

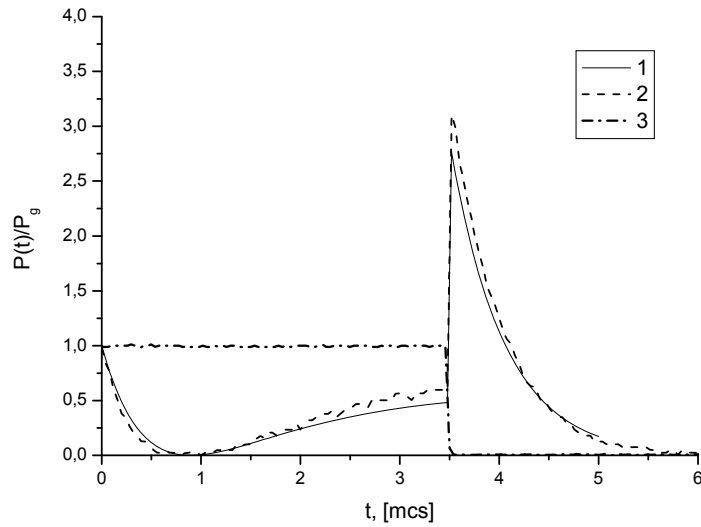


Рис. 7. Переходной процесс отраженного сигнала от резонатора SLED: 1 – вычисления с учетом измеренных параметров, 2 – измерения, 3 – нормированный импульс мощности генератора

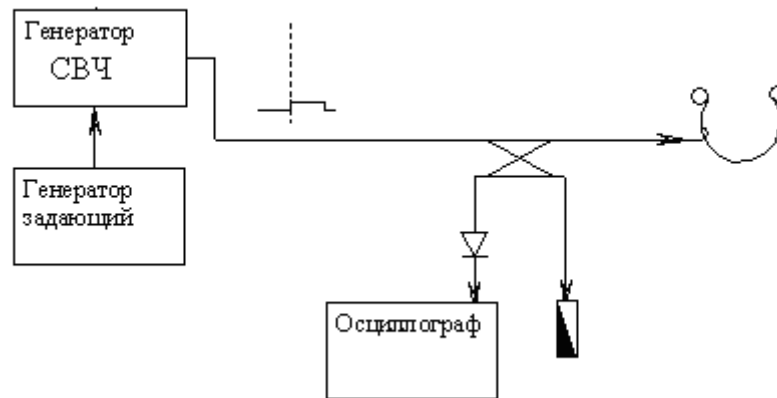


Рис. 8. Схема измерения переходного процесса резонатора

Таблица 1

Измеренные параметры
одного из резонаторов системы SLED

Рабочая частота f_0	~ 2848 МГц
Добротность Q_0	80000
Коэффициент стоячей волны	7,4

сопротивление, $\tau_{0a} = 2Q_0 / \omega_0$ – собственное время структуры, Q_0 и ω_0 – собственная добротность и частота ускоряющей структуры соответственно. Параметры ускоряю-

щей структуры приведены в табл. 2. С помощью выражений (11)–(13) и измеренных характеристик резонаторов системы умножения мощности получены следующие ха-

рактеристики (рис. 10–12): распределение электрического поля вдоль ускоряющей структуры, максимальная амплитуда электрического поля в первой ускоряющей ячейки и зависимость энергии частиц от момента инъекции соответственно. В данном случае использовался сигнал генерато-

ра с переворотом фазы и вычисленная отраженная мощность (см. рис. 9). Считалось, что одна система умножения мощности питает четыре ускоряющих структуры с одинаковым распределением входной мощности, поскольку такую схему планируется использовать для создаваемого стенда.

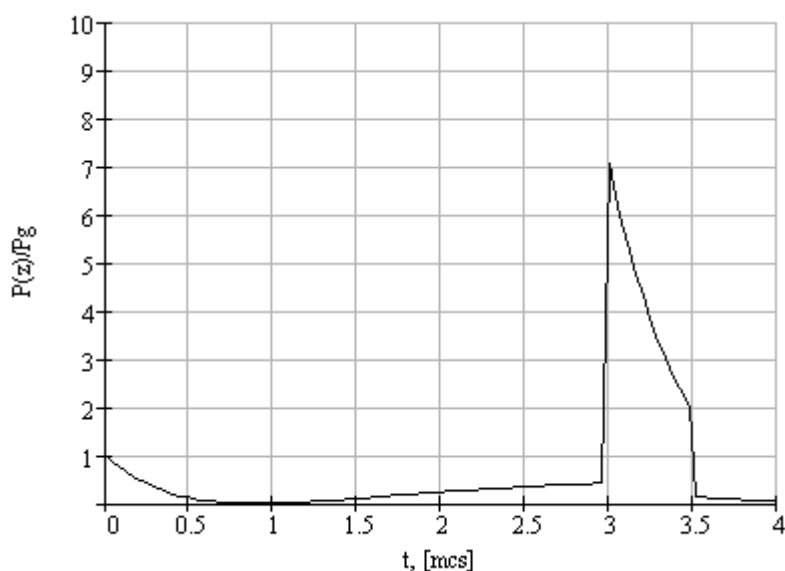


Рис. 9. Расчетная выходная нормированная мощность системы SLED при использовании переворота фазы волны генератора

Таблица 2

Параметры ускоряющей структуры [2]

Рабочая частота	2855.5 МГц
Внутренний диаметр ячейки $2b$	83.75 мм
Диаметр отверстия связи ячеек $2a$	25.9 мм
Толщина диафрагмы t	6 мм
Период D	34.99 мм
Вид колебания θ	$2\pi/3$
Относительная фазовая скорость β_ϕ	1
Относительная групповая скорость $\beta_{ГР}$	0.021
Длина секции L	2.93 м
Полное число ячеек	85
Собственная добротность Q_0	13200
Шунтовое сопротивление R_{sh}	51 МОм/м
Собственное время УС $\tau_{0a} = 2Q_0 / \omega_0$	1.471 мкс
Коэффициент затухания по полю $\alpha_e = 1/\tau_{0a} V_{ГР}$	0.108 м^{-1}
Время заполнения $T_f = L / V_{ГР}$	0.465 мкс

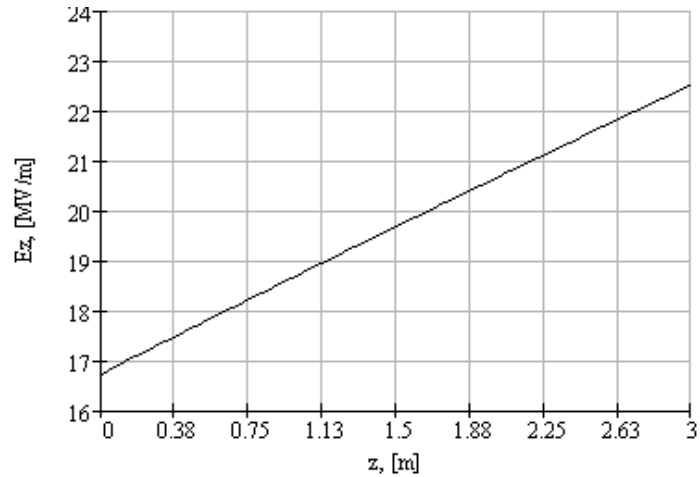


Рис. 10. Распределение амплитуды электрического поля вдоль ускоряющей структуры с использованием четверти мощности системы SLED при мощности генератора 60 МВт

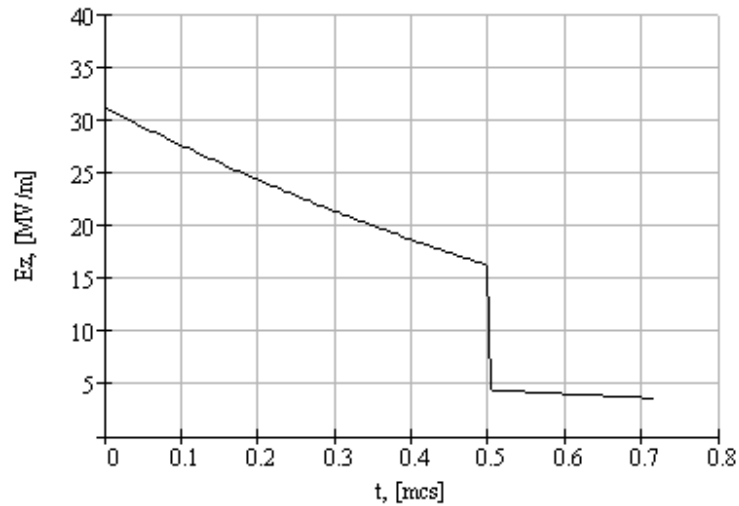


Рис. 11. Максимальная амплитуда электрического поля в первой ускоряющей ячейке ускоряющей структуры с использованием четверти мощности системы SLED при мощности генератора 60 МВт, время отсчитывается от начала переворота фаз

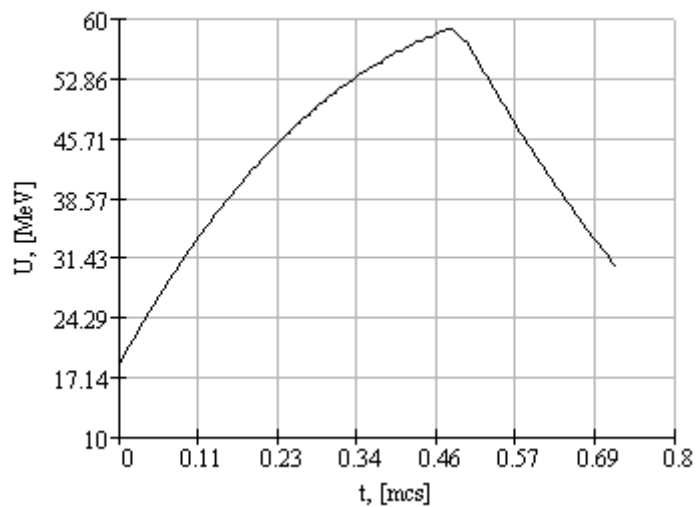


Рис. 12. Энергия, набираемая частицами в зависимости от момента инжекции с использованием четверти мощности системы SLED при мощности генератора 60 МВт, время отсчитывается от начала переворота фаз

Из рис. 10–12 следует, что за счет резкой зависимости выходной мощности системы SLED от времени распределение поля линейно возрастает вдоль ускоряющей структуры. Максимальная амплитуда ускоряющего поля в первой ускоряющей ячейке составляет около 30 МВ/м, что является приемлемым значением с точки зрения пробойной прочности резонаторов структуры. При этом максимальная энергия частиц составляет около 60 МэВ при моменте инъекции, равном времени заполнения структуры $T_f = 0.456$ мкс.

Заключение

Были проведены измерения параметров резонаторов системы умножения мощности типа SLED. Из полученных данных следует, что коэффициент усиления по мощности составляет порядка 7, что обеспечивает максимальную энергию пучка 240 МэВ в ускоряющем модуле, состоящем из четырех ускоряющих секций. При этом распределение поля вдоль ускоряющей структуры линейно возрастает, а амплитуда электрического поля в первой ускоряющей ячейке не должна приводить к пробоям. Полученные результаты являются полностью удовлетворительными, что позволяет использовать разработанные резонаторы в новом ускоряющем модуле.

Список литературы

1. *Emanov F., Andrianov A., Astrelina K. et al.* Feeding BINP colliders with new VEPP-5 injection complex. // Proc. of RuPAC. 2016. P. 56–60
2. *Avilov M. S., Akimov V. E., Alexandrov A. V. et al.* Test of accelerating section for VEPP-5 pre-injector // Preprint BUDKERINP 2000-50.
3. *Farkas Z. D., Hogg H. A., Loew G. A., Wilson P. B.* SLED: A Method of doubling SLAC's Energy // Proc. IX International Conference on High Energy Accelerators. Stanford, California, 1974. P. 576–583.
4. *Вольман В. И., Пименов Ю. В.* Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2000. С. 449–452.
5. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. С. 299–318.
6. *Wangle T. P.* RF Linear Accelerators. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. P. 72–76.

Материал поступил в редколлегию 30.06.2017

**M. V. Maltseva^{1,2}, V. M. Pavlov¹, S. L. Samoilov¹
A. V. Andrianov^{1,2}, I. L. Pivovarov¹**

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics
11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090 Russia Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

a.v.andrianov@inp.nsk.su

MEASUREMENT OF RESONATORS OF THE SLED MULTIPLY POWER SYSTEM

Power compression system consists of high quality cavities, which store electromagnetic field energy. Such system allows increasing the power of accelerating field, which is used for charged particles acceleration in the linear accelerators. The design of the power compression system and the work principle are discussed in the paper. The electromagnetic characteristics of the cavities and the envelope of the reflected power with gain factor are measured. On the basis of achieved data the analysis of work of the disk loaded accelerating structure, which is excited by produced compression system, is presented.

Keywords: SLED, RF-cavities, power multiplication system.