

Передача пикосекундного мегавольтного импульса на вакуумный диод

В.Е. Патраков^{}, С.Н. Рукин, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин*

*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
vitpatrakov@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования выходного тракта пикосекундного электронного ускорителя на основе генератора S-100, с пиковой мощностью 100 ГВт и длительностью выходного импульса 100 пс, и вакуумного диода ИМА3-150Э. Особое внимание уделяется искажениям импульса на неоднородностях тракта, а также искажениям, связанным с потерями энергии в проводниках линии и в заполняющем линию трансформаторном масле. В результате моделирования были получены оптимальные параметры конического перехода тракта, а также оценочные параметры электронного пучка, которые составили: максимальная энергия 2.6 МэВ, ток 21 кА, длительность импульса тока 115 пс.

Ключевые слова: пикосекундная электроника, ускоритель электронов, численное моделирование.

1. Введение

Получение пикосекундных электронных пучков является актуальной задачей мощной импульсной техники, и неразрывно связано с созданием мощных генераторов пикосекундных импульсов [1-3]. В последние годы значительное развитие в разработке мощных пикосекундных генераторов произошло с появлением генераторов на основе линий магнитной компрессии (MCL от англ. Magnetic Compression Line). Принцип работы таких генераторов заключается в последовательном сжатии входного импульса с помощью нескольких каскадно включенных коаксиальных линий передачи, заполненных ферритом в состоянии насыщения. Примером реализации такого подхода является импульсный генератор «S-100» [4, 5], который позволяет получать монополярные электрические импульсы с длительностью менее 100 пс и пиковой мощностью около 100 ГВт (напряжение на нагрузке 48 Ом более 2 МВ).

Для получения коротких пучков электронов в наносекундной технике используются серийные вакуумные диоды (трубки) ИМА3-150Э, номинальным режимом для которых является воздействие импульсов с амплитудой 200 кВ и длительностью 5–10 нс, однако, как отмечено в [3], на укороченных длительностях импульса трубка допускает воздействие напряжения не менее 1 МВ. Представляет интерес изучение воздействия на такие диоды импульсов с пиковым напряжением более 1 МВ, полученных с помощью MCL-подхода.

При подаче на такой диод питающего импульса длительностью в сотни пс следует учитывать искажение импульса при его распространении от генератора к катоду диода из-за неоднородностей тракта и потерь энергии в подводящей линии. Представляет интерес заранее исследовать и оптимизировать параметры тракта с учетом геометрии диода и изучить их влияние на форму импульса, а также провести оценку ожидаемых параметров пучка. Этого можно достигнуть с помощью полноволнового численного моделирования распространения импульса в тракте, чему и посвящена данная работа.

2. Описание модели

Модель распространения импульса в системе основана на численном решении уравнений Максвелла, которые в калибровке Вейля могут быть сведены к одному уравнению (1), выраженному через векторный потенциал A :

$$\nabla \times (\nabla \times A) + \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \varepsilon \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где t – время, μ_0 и ε_0 – магнитная и диэлектрическая постоянные соответственно, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, σ – электрическая проводимость среды.

Для учета искажения короткого импульса при его распространении важен учет потерь энергии и связанной с ними частотной дисперсии фазовой скорости волны. Потери энергии в линии передачи закрытого типа складываются из потерь энергии в проводниках линии и потерь энергии в диэлектриках линии. Потери энергии в металлической стенке при распространении импульса происходят в области, в которую проникает магнитное поле. Для учета этих потерь в расчетную сетку задачи включался приповерхностный слой металлических стенок с толщиной, равной утроенной глубине диффузии поля в проводник d_{diff} , которая при импульсном воздействии может быть оценена по формуле (2):

$$d_{diff} = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{0.5}}{\mu_0 \sigma}}, \quad (2)$$

где $t_{0.5}$ – длительность импульса на полувысоте, σ – электрическая проводимость проводника [6]. В полученной таким образом приповерхностной расчетной области также решалось уравнение (1). Для учета шероховатости поверхности и связанного с ним удлинения пути поверхностных токов, значение проводимости стенки задавалось в 1.5 раза меньше справочного.

Для валидации предлагаемой выше методики был проведен численный расчет распространения короткого импульса по коаксиальному кабелю с потерями в проводниках. Форма переходной характеристики такого кабеля имеет аналитическое выражение [7], и ожидаемая форма искаженного импульса была вычислена с ее помощью по методу интеграла Дюамеля. На Рис. 1а приведено сопоставление формы искаженного импульса, полученной при численном расчете и с помощью аналитической формулы. Наблюдается хорошее согласие, что говорит о корректности учета искажений импульса по предлагаемой методике.

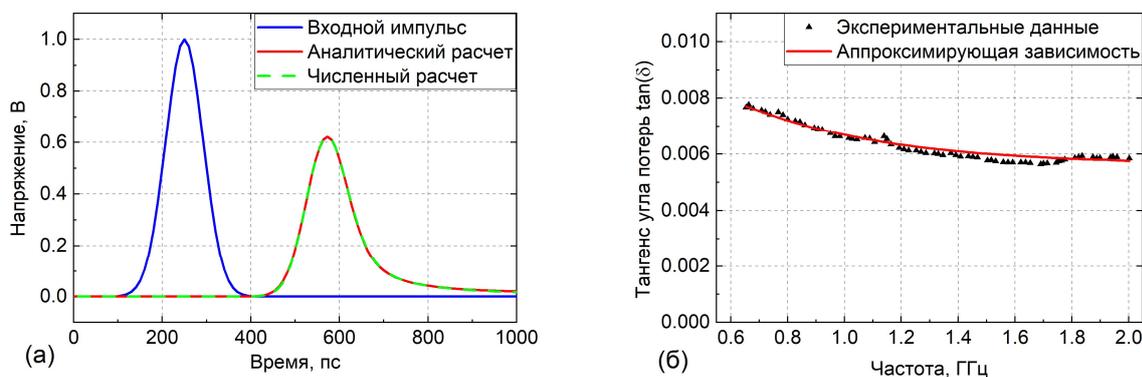


Рис. 1. (а): сопоставление численной методики учета потерь энергии в проводниках линии с аналитическим учетом потерь; (б): экспериментальные измерения тангенса потерь в трансформаторном масле [8] и используемая нами аппроксимирующая зависимость.

Особое внимание при составлении модели было уделено учету потерь энергии в трансформаторном масле, заполняющем линию. Данных по характеристикам потерь трансформаторного масла в СВЧ диапазоне в литературе крайне мало. Модель, используемая в данной работе, основывается на данных измерений коэффициента затухания S_{21} в маслонаполненной коаксиальной линии, приведенных в [8] для полосы частот 0.6–2 ГГц. На Рис.1б приведена зависимость тангенса угла потерь от частоты, полученная на основе

указанных данных. Для аппроксимации этой зависимости нами была использована широкополосная модель, аналогичная описанной в работе [9]. Модель основывается на распределении по интересующей полосе частот нескольких релаксирующих диполей Дебая и подборе их параметров для наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. В нашем случае хорошее качество аппроксимации было получено при трех диполях, характеризующихся вкладом в статическую диэлектрическую проницаемость $\Delta\varepsilon$, равными 0.030, 0.026 и 0.017 и временами релаксации τ_r , равными 2500, 400 и 40 пс соответственно. Полученная в результате аппроксимирующая кривая тангенса потерь приведена на Рис. 1б. Отклонение аппроксимации от экспериментальных данных не превышает 5%.

Математически модель описывается уравнением (3), которое является модификацией уравнения (1) для учета дебаевских составляющих вектора электрической индукции $\mathbf{D}_n = \mathbf{D}_{1,2,3}$, и тремя уравнениями вида (4), описывающими процесс релаксации каждого из диполей:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \varepsilon_\infty \mathbf{E} + \sum_{n=1}^3 \mathbf{D}_n) = 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_n + \tau_{r,n} \frac{\partial \mathbf{D}_n}{\partial t} = \varepsilon_0 \Delta \varepsilon_n \mathbf{E}, \quad (4)$$

где ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, n – номер диполя ($n = 1, 2, 3$), $\Delta \varepsilon_n$ – вклад диполя n в статическую диэлектрическую проницаемость, $\tau_{r,n}$ – время релаксации диполя n , \mathbf{D}_n – часть вектора электрической индукции, обусловленная диполем n . Электрическое поле в принятой калибровке потенциала рассчитывается как $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$. За значение ε_∞ для трансформаторного масла было принято значение относительной диэлектрической проницаемости на оптических частотах, которое может быть рассчитано как квадрат показателя преломления масла и согласно справочным данным равно 2.25 [10].

Описанная модель реализована в двумерной осесимметричной геометрии. Уравнения модели решаются численно с использованием метода конечных элементов. Детали реализации численного расчета и граничные условия аналогичны описанным в работах [11, 12]. Исследуемая геометрия показана на Рис. 2. Она представляет из себя продольное сечение системы и включает плавный конический переход с выходной линией генератора S-100 [5] с диаметрами проводников 50 и 15 мм на стыковочный узел диода ИМА3-150Э с диаметрами проводников 30 и 6 мм, и собственно геометрию продольного сечения диода.

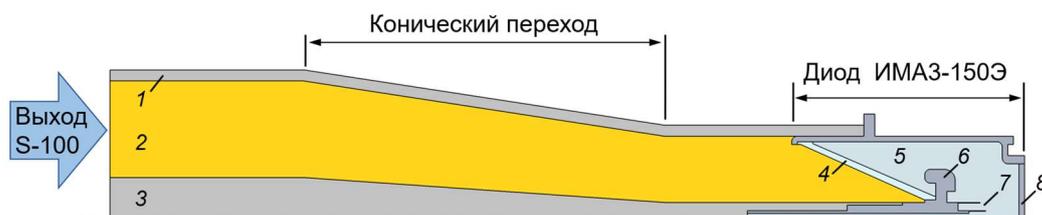


Рис. 2. Расчетная геометрия (плоскость r - z). 1, 3 – проводники линии, 2 – трансформаторное масло, 4 – стеклянный изолятор, 5 – вакуум, 6 – градиентный экран, 7 – катод, 8 – анод.

3. Результаты моделирования

3.1. Оптимизация конического перехода

В ходе численного моделирования системы была изначально проведена оптимизация конического перехода по длине. Для оценки собственных передаточных характеристик перехода, моделирование проводилось при работе перехода на согласованную нагрузку. В качестве испытательного импульса был взят импульс стандартной колоколообразной формы (функция Гаусса) с длительностью на полувысоте 100 пс. В качестве материала

проводников перехода был задан алюминий. Были проведены расчеты распространения импульса через переходы разной длины, результаты которых представлены на Рис. 3а. Для описания искажения импульса были введены коэффициент передачи мощности k_P и коэффициент увеличения длительности k_t , определяемые как соотношения соответствующих величин на выходе и входе перехода. Как видно из данных Рис. 3а, оптимальные значения этих коэффициентов достигаются при длине перехода 40–50 мм – коэффициент передачи мощности составляет около 0.93, коэффициент увеличения длительности менее 1.02. Входная и выходная расчетные осциллограммы при подаче на переход оптимальной длины (50 мм) импульса с генератора S-100 амплитудой 2.23 МВ (мощность в линии 103 ГВт) и длительностью на полувысоте 103 пс приведены на Рис. 3б. Наблюдается хорошее сохранение формы импульса: длительность импульса на выходе перехода составляет 105 пс, а амплитуда напряжения – 2.48 МВ (прирост напряжения связан с увеличением волнового сопротивления). Пиковая мощность импульса на выходе перехода составляет около 96 ГВт.

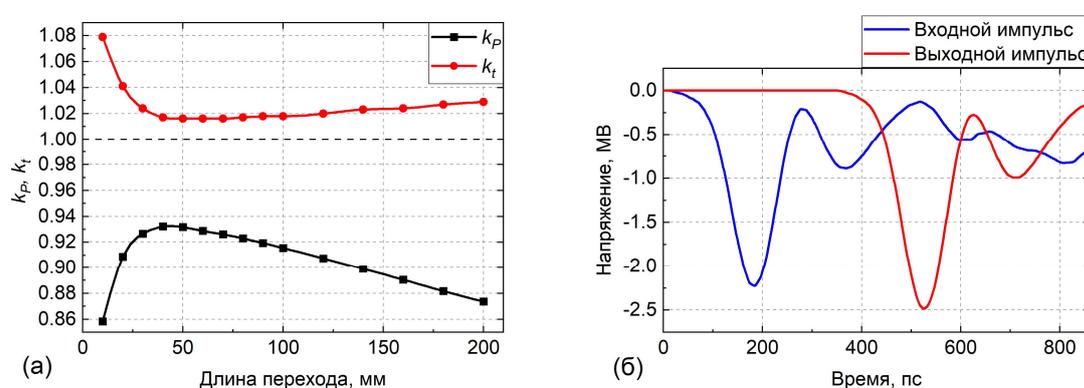


Рис.3. (а): характеристики искажения параметров импульса коническим переходом; (б): расчетные осциллограммы напряжения при подаче импульса с генератора S-100 на переход оптимальной длины.

3.2. Исследование внутреннего тракта вакуумного диода

Далее были рассмотрены искажения импульса, вызванные его прохождением по вакуумному диоду. Внутренняя геометрия диода представлена на Рис.2 (основные элементы 4-8). На основании данных [1] в качестве материала проводников диода был задан ковар, удельное сопротивление которого равно $0.49 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Согласно [10], для спая с коваром в подобных устройствах используется электровакуумное стекло С48-1, параметры которого были приняты в расчете для стеклянного изолятора диода. Диэлектрическая проницаемость этого стекла составляет около 5.4. Диэлектрические потери в стекле не учитывались, так как тангенс потерь С48-1 по данным [10] в полосе частот от 1 МГц до 10 ГГц достаточно мал, и в исследуемой задаче толщина стеклянного изолятора относительно невелика.

Для оценки величины неоднородностей тракта в диоде была численно рассчитана его импульсная рефлектограмма (Рис. 4а). Расчет проводился при времени нарастания зондирующего импульса-ступеньки 100 пс, чтобы наиболее корректно оценить влияние неоднородностей тракта на рабочий импульс. При расчете рефлектограммы ускоряющий промежуток был заменен согласованной нагрузкой (в противном случае сильное отражение от промежутка не позволяет различить отражения от элементов диода). Левая шкала Рис.4а проградуирована в единицах коэффициента отражения, а правая – в единицах волнового сопротивления тракта. Цифровые обозначения на рефлектограмме соответствуют: 1 – входному узлу, 2 – переходу «масло-вакуум», 3 – градиентному экрану, 4 – катоду.

Из полученных данных следует, что основную неоднородность в тракт вносит градиентный экран 3, и его профиль на рефлектограмме соответствует включенной в линию

шунтирующей емкости [7]. Фоновое нарастание волнового сопротивления с 64 до 92 Ом соответствует плавному переходу с входной секции диода (1), заполненной маслом, на вакуумную секцию (4) через стеклянный изолятор (2). Оценка величины эквивалентной емкости экрана по известной методике с помощью площади, ограниченной на участке 3 рефлектограммой и фоновым уровнем сигнала [7] дает значение около 0.64 пФ. Это значение близко к значению 0.6 пФ, приведенному в работе [3] для данного диода.

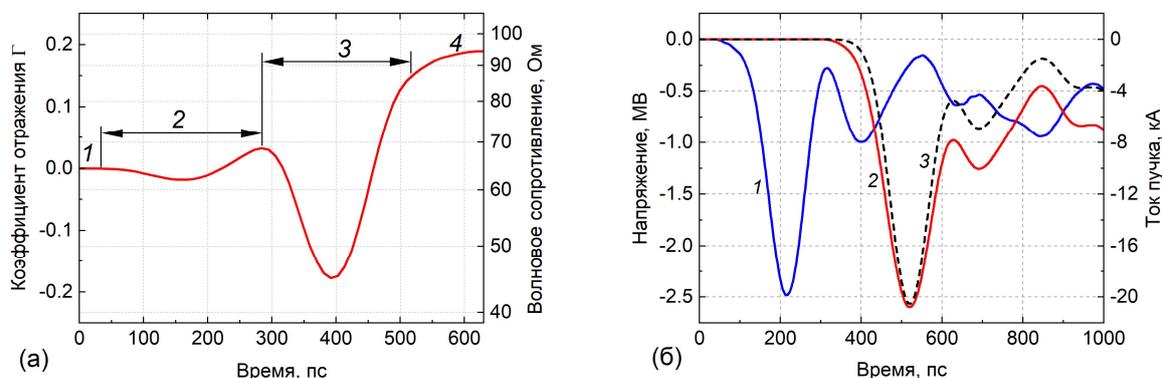


Рис 4. (а): расчетная рефлектограмма вакуумного диода ИМА3-150Э (пояснения см. в тексте); (б): расчетные осциллограммы на входе вакуумного диода и на ускоряющем промежутке: 1 – входной импульс напряжения, 2 – напряжение на ускоряющем промежутке, 3 – ток электронного пучка.

3.3. Оценка параметров электронного пучка

Для оценки максимальной энергии электронов и тока пучка, а также их временных характеристик, необходимо учесть в модели двухстороннее взаимодействие падающей волны с током в вакуумном диоде, поскольку нагружение генератора током пучка сильно влияет на параметры ускоряющего импульса. Так как в нашей модели не реализован учет динамики ускоряемых частиц, был применен упрощенный подход, в котором ускоряющий промежуток диода был заменен эквивалентным нелинейным резистивным элементом, связывающим ток и напряжение в промежутке законом Чайлда-Ленгмюра (законом «степени 3/2»). Напряжение и ток элемента определялись соответствующим интегрированием электрической и магнитной компонент поля в области ускоряющего промежутка. Из данных по току и напряжению для исследуемого диода, приведенных в [13] следует, что перванс такого диода приблизительно равен $4.9 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$. Это значение и было подставлено в уравнение нелинейного резистивного элемента, связывающее указанные интегральные величины на условной линии «катод-анод». Таким образом, математически необходимое взаимодействие волны с пучком частиц было реализовано с помощью дополнительного граничного условия для волновой задачи.

Расчетная осциллограмма напряжения на промежутке с учетом взаимодействия «волна-пучок» в описанном выше приближении показана на Рис.4б. В качестве входного импульса был взят расчетный импульс, полученный после прохождения конического перехода. Расчеты с учетом и без учета потерь в проводниках диода показали, что заметного влияния на форму импульса на ускоряющем промежутке они не оказывают. Длительность ускоряющего импульса, приложенного к промежутку, составила 144 пс, а амплитуда – 2.60 МВ, что соответствует максимальной энергии электронов в 2.60 МэВ. Амплитуда импульса тока в диоде составила 20.5 кА, а длительность 115 пс. Мощность пучка составляет 53.3 ГВт.

4. Заключение

В данной работе было проведено численное исследование работы пикосекундного генератора S-100 в качестве источника питания для импульсного вакуумного диода с холодным катодом ИМА3-150Э. Пиковая мощность выходного импульса генератора

составляет около 100 ГВт, а длительность – около 100 пс. Расчетная модель основана на численном решении уравнений Максвелла методом конечных элементов. При составлении модели особое внимание было уделено учету потерь энергии в проводниках и диэлектриках линии и связанных с ними искажений импульса. Модель учитывает взаимодействие бегущей волны с током электронного пучка в диоде с помощью закона Чайлда-Ленгмюра.

С помощью составленной модели было проведено исследование конического перехода с выходной линии генератора на вакуумный диод, в результате чего было установлено, что оптимальная длина перехода составляет 50 мм. Также было рассмотрено распространение импульса по вакуумному диоду. Неоднородности волнового сопротивления в диоде были проанализированы с помощью расчета рефлектограммы диода. Было показано, что в данных условиях импульс ускоряющего напряжения на катоде имеет амплитуду 2.6 МВ и длительность около 140 пс, а импульс тока электронов – амплитуду около 21 кА и длительность 115 пс. Мощность пучка в таком режиме составляет 53 ГВт.

Благодарности

Представленное исследование поддержано Российским научным фондом, грант № 24-19-00407, <https://rscf.ru/project/24-19-00407/>.

5. Список литературы

- [1] Г.А. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника*. М: Наука, 2004.
- [2] Г.А. Месяц, М.И. Яландин, Пикосекундная электроника больших мощностей, *УФН*, том **175**, 225, 2005, doi: 10.3367/UFNr.0175.200503a.0225
- [3] К.А. Желтов, *Пикосекундные высокоточные электронные ускорители*. М: Энергоатомиздат, 1991.
- [4] E.A. Alichkin, M.S. Pedos, A.V. Ponomarev et al, Picosecond solid-state generator with a peak power of 50 GW, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **91**, 104705, 2020, doi: 10.1063/5.0017980
- [5] M. S. Pedos, E. A. Alichkin, V. E. Patrakov et. al., Picosecond multi-gigawatt 4-stage magnetic compressor, *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, Nov. 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S4-O-041801
- [6] Э.М. Базелян, Ю. П. Райзер, *Искровой разряд*. М: Изд-во МФТИ, 1997.
- [7] Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др., *Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов*. М: Радио и связь, 1984.
- [8] I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, V.P. Gubanov, et al., Repetitive sub-gigawatt rf source based on gyromagnetic nonlinear transmission line, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **83**, 074705, 2012, doi: 10.1063/1.4738641
- [9] A.R. Djordjevic, R.M. Bilje, V.D. Likar-Smiljanic, and T.K. Sarkar, Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. **43**, 662, 2001, doi: 10.1109/15.974647
- [10] Ю.В. Корицкий, Б.М. Тареев, В.В. Пасынков, *Справочник по электротехническим материалам. Том 2, 2-е издание*. М: Энергоатомиздат, 1987.
- [11] V.E. Patrakov, S.N. Rukin, Computer simulation of multi-gigawatt magnetic compression lines, *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, Nov. 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S6-P-017001
- [12] В.Е. Патраков, Численное моделирование пикосекундных линий магнитной компрессии, *МНИЖ*, том **143**, 1, 2024, doi: 10.60797/IRJ.2024.143.177
- [13] Е.Х. Бакшт, И.Д. Костыря, Е.И. Липатов и др., Электроны с повышенной энергией в наносекундном электронном пучке вакуумного диода, *ЖТФ*, том **77**, 98, 2007.