

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 53.07

ПРОЕКТ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

© 2025 г. К. И. Козловский^а*, Е. Д. Вовченко^а, А. А. Исаев^б, Е. А. Морозова^а, А. Е. Шиканов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409 Россия

^бРоссийский технологический университет «МИРЭА», Москва, 119454 Россия

*E-mail: kozlowskij2013@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.05.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Предложен проект малогабаритного импульсного генератора нейтронов с лазерным источником дейтронов с магнитной изоляцией, в котором в качестве источника ускоряющего напряжения используется модификация импульсного высоковольтного трансформатора. При этом подавление электронной проводимости осуществляется магнитным полем, возбуждаемым в первичном контуре трансформатора. Приводятся оценки электродинамических параметров диодной системы генератора. Показана возможность осуществлять генерацию нейтронов с использованием ядерной реакции $\text{Li}(p,n)\text{He}$, что открывает перспективы эффективного использования генератора нейтронов в радиационной терапии.

Ключевые слова: генератор нейтронов, лазерный источник нейтронов, магнитная изоляция электронов, ионный диод

DOI: 10.56304/S2079562924060204

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] проведен анализ результатов, полученных сотрудниками НИЯУ МИФИ в процессе создания и исследования диодных ускорителей с лазерным источником ионов и магнитной системой подавления электронного компонента, реализующих технические решения, описанные в работах [2–4]. Дальнейшее усовершенствование этих изделий предполагается осуществлять в направлении уменьшения габаритов и увеличения энергии ускоряемых дейтронов в процессе реализации технического решения [5], предложенного авторами. В [5] исключение габаритного высоковольтного изолятора осуществляется с помощью одновременной магнитной изоляции в ускоряющем дейтроне зазоре и в зазоре между вакуумной камерой и источником ускоряющего напряжения, расположенным внутри вакуумной камеры. При этом в габаритах имеющихся импульсных генераторов нейтронов на ускоряющее напряжение до 150 кВ возможно достижение ускоряющего напряжения вплоть до 1.5 МВ за счет увеличения пробойной напряженности электрического поля со 100 кВ/см до 1 МВ/см в зазорах между анодом и катодом, а также между вторичной обмоткой импульсного трансформатора (подвешена заземленным концом в вакуумной камере) и корпусом вакуумной камеры. В результате в предлагаемом

компактном устройстве на два–три порядка увеличивается выход нейтронов.

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДИОДНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

На рис. 1 представлена схема такого малогабаритного генератора нейтронов с лазерным источником дейтронов и импульсной магнитной изоляцией диодной ускоряющей системой, разрабатываемого сотрудниками НИЯУ МИФИ в настоящее время.

Согласно этой схеме, от источника постоянного высокого напряжения 5 осуществляется зарядка накопительной емкости 7. После этого лазер 1 генерирует импульс излучения с энергией ~ 1 Дж и длительностью ~ 10 нс. Часть лазерного излучения с помощью частично прозрачного зеркала и линзы фокусируется на электроде 4 воздушного или газонаполненного разрядника, принцип действия которого описан в работе [6]. Через него происходит разрядка накопительной емкости на электрод 15, представляющий собой виток или виток, в виде разрезного цилиндра высотой H и диаметром D , охватывающий весь вакуумный объем нейтронного генератора, как показано на рис. 1, или 2–3 таких витка, как это сделано в работе [7], приме-

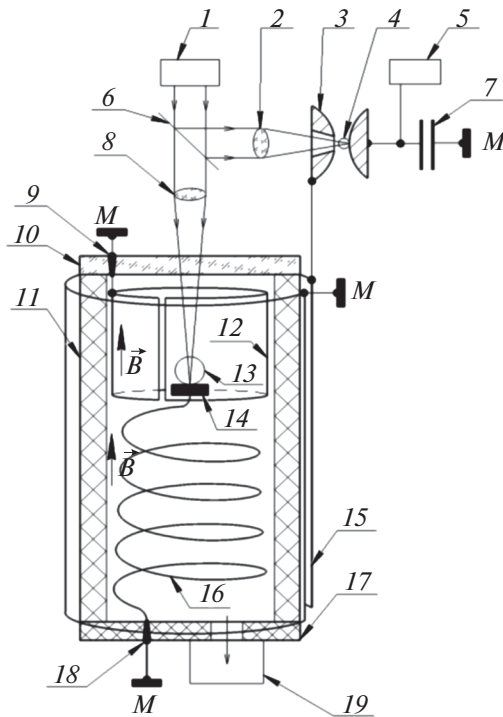


Рис. 1. Генератор нейтронов: 1, импульсный лазер; 2, фокусирующая линза разрядного устройства; 3, 4, электроды разрядника, поджигаемого лазером; 5, высоковольтный зарядный блок; 6, частично прозрачное зеркало; 7, накопительная емкость; 8, фокусирующая линза лазерного источника дейтронов; 9, первый ввод заземления; 10, оптический ввод лазерного излучения; 11, диэлектрический герметичный корпус вакуумной камеры генератора нейтронов; 12, катод с внутренним нейтронообразующим покрытием; 13, предполагаемый передний фронт лазерной плазмы; 14, плазмообразующая (лазерная) мишень; 15, электрод, формирующий переменное магнитное поле, в вакуумной камере; 16, спиральная электромагнитная линия, генерирующая высоковольтный электрический потенциал на плазмообразующей мишени; 17, диэлектрический торец корпуса; 18, второй ввод заземления; 19, система вакуумной откачки.

нительно к импульсному генератору рентгеновских квантов.

Зарядное напряжение U изменяется во времени пропорционально току разряда I_p , согласно уравнению

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{I_p}{C},$$

где C — величина накопительной емкости.

По закону электромагнитной индукции изменение во времени азимутального тока, протекающего по электроду 15, примерно равно току разряда накопительной емкости и соответствует уравнению:

$$L \frac{dI_p}{dt} \approx U,$$

где $L \approx \frac{\pi \mu_0 D^2}{4 H}$ — индуктивность электрода 15, μ_0 — магнитная постоянная.

Из этих уравнений вытекает зависимость тока разряда от времени:

$$I_p(t) = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(t/\tau),$$

где $\tau = \sqrt{LC}$.

При этом в области, охватываемой электродом 15, создается магнитное поле, направленное вверх, с величиной индукции, определяемой формулой

$$B(t) \approx \mu_0 \frac{I_p(t)}{H} = \mu_0 \frac{U_0}{H} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(t/\tau) = B_0 \sin(t/\tau),$$

где $B_0 \approx \frac{2U_0}{D} \sqrt{\frac{C\mu_0}{\pi H}}$.

Электрический потенциал, создаваемый на плазмообразующей мишени, определяется уравнением:

$$U_s \approx \frac{\pi}{4} N D_s^2 \frac{dB}{dt} - N \frac{\pi}{4} D_s^2 \frac{dB_s}{dt},$$

$$U_s \approx \frac{\pi}{4} N D_s^2 \frac{B_0}{t} \cos\left(\frac{t}{\tau}\right) - N \frac{\pi}{4} D_s^2 \frac{dB_s}{dt},$$

где N , D_s — соответственно число витков и внутренний диаметр спиральной линии 16,

$$B_s(t) \approx \mu_0 \frac{N I_s(t)}{H_s}$$

— величина индукции магнитного поля, создаваемого током, протекающим в спирали,

$$I_s \approx I_d + C_s \frac{dU_s}{dt},$$

в соответствии с первым правилом Кирхгофа, H_s — продольный размер спирали, C_s — емкость, определяемая взаимодействием витков спирали с электродом 15 и между собой. Этим параметром ввиду малости по сравнению с накопительной емкостью будем в дальнейшем пренебрегать.

$$I_d \approx \frac{U_s}{R}$$

— ток дейтронов, протекающий через диодный зазор, R — эквивалентное сопротивление диодного зазора.

Из этих формул вытекает соотношение

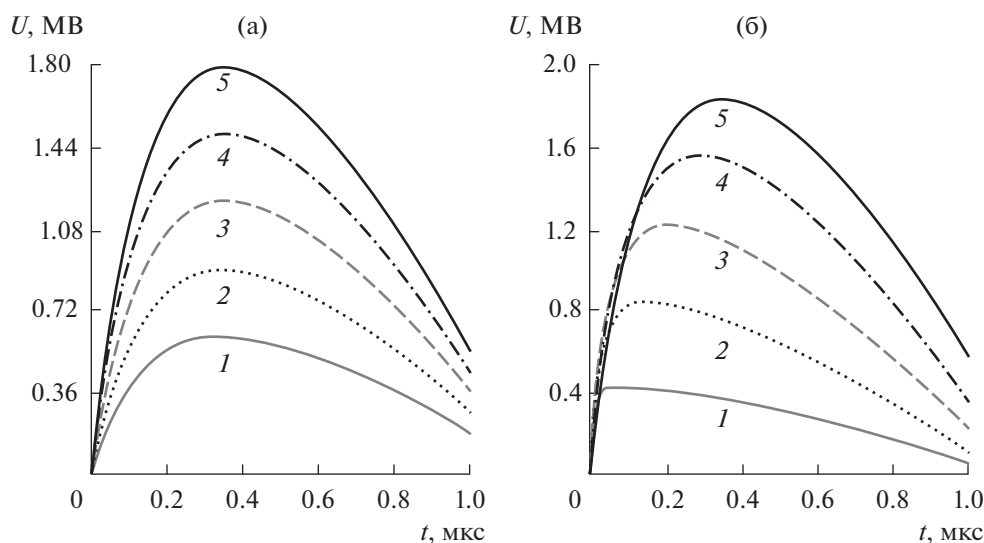


Рис. 2. Зависимость напряжения на вторичной обмотке (50 витков) от времени при различных напряжениях на первичной обмотке (1 – 20 кВ, 2 – 30 кВ, 3 – 40 кВ, 4 – 50 кВ, 5 – 60 кВ) (а); зависимость напряжения на вторичной обмотке от времени от числа витков во вторичной обмотке (1 – 10 вит., 2 – 20 вит., 3 – 30 вит., 4 – 40 вит., 5 – 50 вит.) при 60 кВ на первичной обмотке (б).

$$U_s \approx NU_0 \frac{D_s^2}{D^2} \cos(t/\tau) - N^2 \frac{\pi\mu_0}{4H_s} D_s^2 \frac{dI_s}{dt} \approx \\ \approx NU_0 \frac{D_s^2}{D^2} \cos(t/\tau) - N^2 \frac{\pi\mu_0}{4H_s R} D_s^2 \frac{dU_s}{dt},$$

которое представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка. Оно может быть записано в следующем безразмерном виде

$$\frac{dw}{du} + \alpha w = \beta \cos(u),$$

где введены обозначения

$$u = t/\tau, \quad w = U_s/U_0, \\ \alpha = \frac{2H_s R D}{D_s^2 N^2} \sqrt{\frac{C}{\pi\mu_0 H}}, \quad \beta = \frac{2H_s R}{N D} \sqrt{\frac{C}{\pi\mu_0 H}}.$$

Интегрируя его с начальным условием $u(0) = 0$, имеем, с учетом введенных выше обозначений

$$U(t) = \frac{\beta U_0}{\alpha^2 + 1} \{ \alpha [\cos(t/\tau) - \exp(-\alpha t/\tau)] + \sin(t/\tau) \}.$$

На рис. 2 представлены результаты решения этого дифференциального уравнения в виде семейства зависимостей $U(t[\mu\text{с}], U_0[\text{МВ}], N)$.

Семейства построены для значений $C = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$, $D = 0.3 \text{ м}$, $D_s = 0.25 \text{ м}$, $H = 0.6 \text{ м}$, $H_s = 0.4 \text{ м}$, $R = 3 \cdot 10^8 \text{ Ом}$, $U_0 = 20\text{--}60 \text{ кВ}$, $N = 10\text{--}50$.

Из рис. 2а видно, что при определенных значениях параметров генератора потенциал на лазерной мишени может превышать значение равное порогу ядерной реакции $\text{Li}(p, n)\text{Be}$ (порог этой ре-

акции составляет 1.65 МэВ), а энергия нейтронов составлять при этом десятки килоэлектронвольт. Последнее обстоятельство открывает возможность ее эффективно использовать в радиационно-захватной терапии онкологических заболеваний. Оценки показывают, что нейтронный выход за импульс, генерируемый на этой реакции, должен превышать 10^7 нейтронов.

Указанные выше параметры генератора позволяют также использовать его для генерации нейтронов реакций $\text{D}(d, n)^3\text{He}$, $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$, $\text{T}(d, n)^4\text{He}$. При этом нейтронный выход может превышать, как показано в [8], значение $\sim 10^{10}$ н/импульс.

Достижение указанных нейтронных параметров возможно за счет эффективного подавления потока эмиссионных электронов магнитным полем, создаваемым током, протекающим в электроде 15. Зависимость индукции поля [Тл] от времени [мкс] иллюстрирует рис. 3.

Из этого графика, используя результаты [1, 9, 10], можно сделать вывод о существенном превышении индукции магнитного поля, создаваемого электродом 15, ее критических значений, при которых электронный компонент эффективно подавляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен импульсный генератор нейтронов, в котором существенное увеличение выхода нейтронов осуществляется за счет

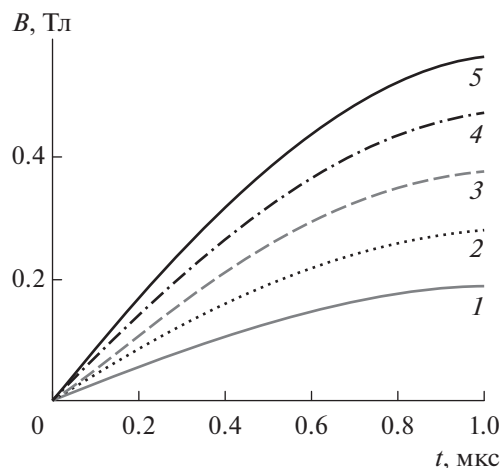


Рис. 3. Зависимость индукции поля в зазоре между анодом и катодом от времени при различных напряжениях на первичной обмотке (1 – 20 кВ, 2 – 30 кВ, 3 – 40 кВ, 4 – 50 кВ, 5 – 60 кВ).

значительного роста ускоряющего дейтроны напряжения при сохранении габаритов вакуумной ускорительной трубки и всего импульсного генератора нейтронов в целом.

Данный проект позволит повысить эффективность исследований радиационной стойкости материалов и микросхем, проведения БНЗТ (бор-нейтрон захватная терапия) раковых клеток, а так-

же нейтронно-активационного анализа различных горных пород в полевых условиях, в том числе содержащих уран и драгоценные металлы, и работ, связанных с поиском и идентификацией скрытых опасных предметов нейтронными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERECES

1. Vovchenko E.D., Isaev A.A., Kozlovsky K.I., et al. // Communication JINR P13-2023-10. 2023. Dubna.
2. Bepalov D.F., Mints A.Z., Pleshakova R.P., Shikanov A.E. // SU Inventor's Certificate No. 457406. 1972.
3. Bepalov D.F., Kozlovsky K.I., Tsybin A.S., Shikanov A.E. // SU Inventor's Certificate No. 766048. 1979.
4. Gulko V.M., Kozlovsky K.I., Kolomiets N.F., et al. // SU Inventor's Certificate No. 1468275. 1987.
5. Isaev A.A., Kozlovsky K.I., Morozova E.A., et al. // RF Patent No. 2813664. 2024.
6. Gusarov V.N., Kozlovsky K.I., Tsybin A.S., Shikanov A.E. // Radiophys. Quantum Electron. 1984. V. 27 (4). P. 346–350.
7. Myagkov B.A., Shikanov E.A., Shikanov A.E. // At. Energy. 2009. V. 106 (2). P. 143–148.
8. Anan'in O.B., Tsybin A.S., Shikanov A.E., Kozlovsky K.I. // At. Energy. 2013. V. 115 (2). P. 137–141.
9. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovsky K.I., et al. // At. Energy. 2016. V. 110 (4). P. 258–264.
10. Kozlovsky K.I., Ponomarev D.D., Ryshkov V.I., et al. // At. Energy. 2012. V. 112 (3). P. 221–224.

Project of a High Efficiency Small-Sized Laser Neutron Generator

K. I. Kozlovsky¹*, E. D. Vovchenko¹, A. A. Isaev², E. A. Morozova¹, and A. E. Shikanov¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

² Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454 Russia

*e-mail: kozlovskij2013@yandex.ru

Received May 22, 2024; revised June 6, 2024; accepted June 11, 2024

Abstract—The project of a small-sized pulsed neutron generator with a laser deuteron source with magnetic isolation has been proposed with a modification of a pulsed high-voltage Tesla transformer used as the accelerating voltage source. In this case, the electronic conductivity is suppressed by the magnetic field excited in the primary circuit of the transformer. The electrodynamic parameters of the generator diode system have been estimated. The possibility of neutron generation using the $\text{Li}(p, n)\text{Be}$ nuclear reaction has been shown, which opens up prospects for the effective use of the neutron generator in radiation therapy.

Keywords: neutron generator, laser neutron source, magnetic electron isolation, ion diode