

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
С ЭНЕРГИЕЙ 20+50 МЭВ

Г. П. Мхеидзе, М. Д. Райзер,
М. С. Рабинович, А. А. Рухадзе

I. Прогресс высоковольтной импульсной техники позволил за последнее десятилетие существенно повысить параметры электронных ускорителей (ЭУ). В настоящее время становятся реальностью пучки с полной энергией в несколько МдЖ и мощностью порядка 10^{13} - 10^{14} ватт в импульсе. Реализация таких энергий и мощностей в электронных пучках открывает перспективы их использования для нагрева твердотельных мишеней до термоядерных температур /1/, для исследования фазовых превращений и получения новых материалов /2/; пучки находят применение при исследовании воздействия излучения на материалы и агрегаты /3/, для турбулентного нагрева плазмы /4/, электронной накачки лазеров /5/, в качестве инжектора для ускорителей, для реализации коллективных методов ускорения ионов /6/ и т.д.

Развитие электронных ускорителей в основном характеризуется тенденцией увеличения тока пучка /7-15/ (табл. I). В то же время электронные пучки с несколько меньшими токами (до ста килоампер), но с энергией электронов в диапазоне 20 - 50 Мэв чрезвычайно интересны для плазменной и квантовой электроники и ядерной физики. Такие ускорители нашли бы применение для создания мощных плазменных генераторов и усилителей электромагнитного излучения сантиметрового диапазона, основанных на коллективном взаимодействии электронного пучка с плазмой, которое наиболее эффективно проявляется при ультррелятивистских энергиях электронов. Высокий КПД преобразования энергии пучка в энергию излучения, который при указанных параметрах пучка может достигать 10 - 30%, и относительная узость линий генерации порядка 10^{-3} - 10^{-4} , делают такие системы весьма перспективными.

При энергиях электронов, превышающих 20 Мэв, интенсивно идут ядерные реакции с рождением нейтронов, и поэтому электронные пучки с указанными выше параметрами могут служить мощным источником нейтронного излучения, не говоря уж о том, что такие пучки, очевидно, являются источниками мощного узконаправленного поляризованного рентгеновского и γ -излучений. Наконец, при достаточно больших токах такие пучки будут генерировать интенсивные потоки электронно-позитронных пар, представляющие интерес для проверки законов квантовой электродинамики.

Ниже рассматривается одна из возможностей создания электронного ускорителя с указанными параметрами пучка.

Таблица I

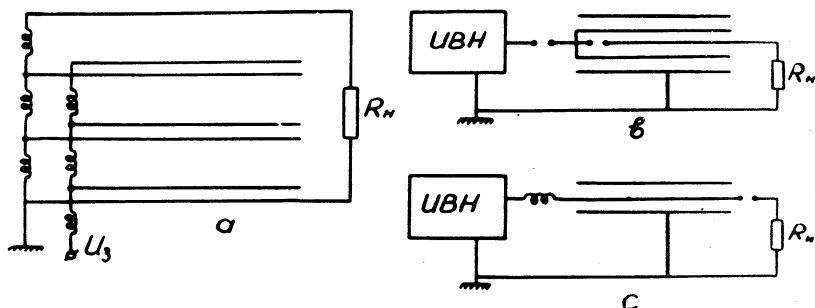
| Электронный ускоритель | /7/ | /8/ | /9/ | /10/ "Термес II" | /11/ | /12/ | /13/ | /14/ | /15/ "Гембл I" |
|--|------|------|------|---------------------|------|------|------|------|-------------------|
| Дата опубликования | 1967 | 1967 | 1967 | 1969 | 1969 | 1970 | 1970 | 1970 | 1970 |
| Энергия Электронов U_e (Мэв) | 2 | 3 | 3 | 12 | 0,5 | 1 | 0,4 | 1,2 | 1 |
| Ток электронов I_e , кА | 5 | 30 | 50 | 170 | 100 | 160 | 12 | 120 | 1000 |
| Длительность импульса $\tau_{им}$, нсек | 50 | 25 | 30 | 70 | 50 | 80 | 30 | 60 | 100 |

2. Силовая часть большинства ЗУ базируется на разновидностях нескольких основных схем^{*)}.

На рис. 1а представлен генератор импульсного напряжения (ГИН) с линиями в качестве накопительных элементов, заряжаемый от источника постоянного напряжения U_3 (десятки киловольт). В этой схеме /7/ совмещены функции генерации и формирования импульса СВВ напряжения. В схемах рис. 1 в, с источник напряжения

^{*)} Вопрос формирования импульсов сверхвысоковольтного (СВВ) напряжения рассмотрен в /16/.

(ГИН /9/, трансформатор Тесла /17/, генератор Ван де Граафа /8/) заряжает линию, обычно коаксиальную (двойную /9/ -рис. 1в или одинарную /8/ - рис. 1с), которая формирует импульс. Схемы а и в,с (рис. 1) отражают два, методически противоположных подхо-



Р и с. 1. Однокаскадный (а) и двухкаскадные (в, с) способы генерации СВВ напряжения. ИВН - источник высокого напряжения; R_n - нагрузка.

да к вопросу формирования СВВ импульса. Достоинством схемы а является малая величина зарядного напряжения и кратковременность действия СВВ напряжения. Это позволяет максимально увеличить напряженность электрического поля в диэлектрике и получить максимальную удельную энергоемкость. Серьезным недостатком является необходимость синхронизации с наносекундной точностью большого количества разрядников. В схемах в,с коммутация осуществляется одним разрядником (при СВВ напряжении). Основные недостатки такого способа генерации - уменьшение электропрочности изолирующих элементов, связанное с длительным временем зарядки и большой площадью поверхности формирующей линии, и большие габариты^{*)}.

*) Минимальный диаметр двойной коаксиальной формирующей линии $D_{\min} \approx 4eU_b/E_m(\sqrt{\epsilon}\rho = 30)$ при равенстве волновых сопротивлений $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ внутренней и наружной линий и $D_{\min} \approx 2\exp(1 - 1/e) \times U_b/E_m(\sqrt{\epsilon}\rho_1 = 60)$ при равенстве максимальных напряженностей полей $E_1 = E_2 = E_m$. Электропрочность трансформаторного масла E (кВ/см) связана со временем t (мксек) воздействия поля и площадью s (см²) формирующей линии соотношением $1/10 / \lg Et^{1/3} \approx -0,081gS - 0,3$.

Следует заметить, что при одинаковых волновых сопротивлениях ρ и максимальных напряженностях поля E_m энергоемкость полосковой линии ω_n больше, чем коаксиальной $\bar{\omega}_k$

$$\frac{\omega_n}{\bar{\omega}_k} = \frac{e^{\xi} - 1}{\xi}, \quad \text{где} \quad \xi = \frac{\sqrt{\epsilon} \rho}{60}.$$

Таким образом, увеличение напряжения и тока в ЭУ по схеме рис. 1 б ведет к чрезмерному увеличению габаритов, а по схеме рис. 1 а - к большому количеству разрядников.

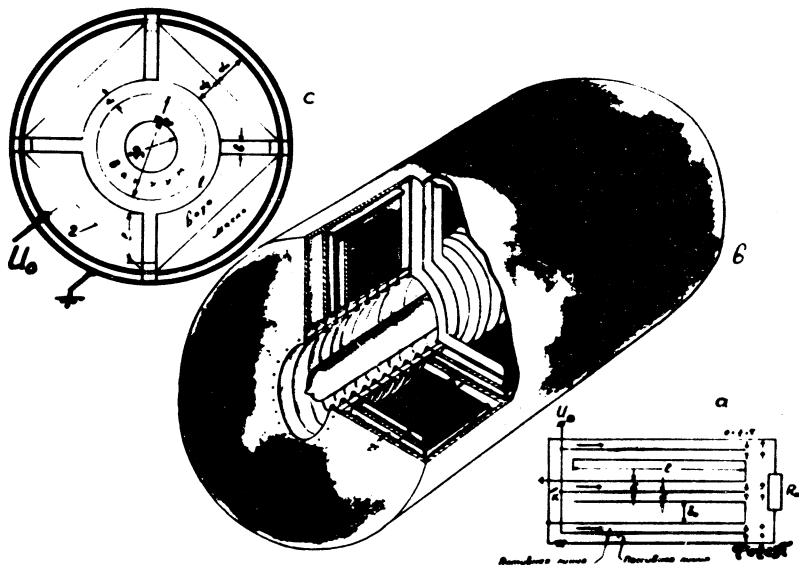
Некоторым компромиссом между указанными подходами к формированию СВВ напряжения можно считать схему умножения напряжения на n полосковых линиях /16/ при ее импульсной зарядке до некоторого промежуточного напряжения U_0 (рис. 2а). При замыкании ключа k через время $\tau \approx \sqrt{\epsilon} l/c$, необходимое волне для прохождения активных линий длиной l , в результате инверсии поля при отражениях от разомкнутых концов линий напряжения складывается, и на нагрузке амплитуда импульса /18/ $\sim knU_0 R_n / (R_n + \rho)$ (k - коэффициент, учитывающий потери; ρ - волновое сопротивление линии, R_n - нагрузка). Для развязывания активных линий от пассивных развязывающий импеданс ρ_0 должен быть большим: $\rho_0 \gg \rho$ (т.е. $\delta_0 \gg \delta$).

Нам представляется целесообразным выбрать схему построения ЭУ с энергией $W = 30 + 50$ Мэв, током $I = 30 + 60$ ка и $\tau_n \approx \pm 100$ нсек именно по схеме рис. 2а, причем использовать импульсное зарядное напряжение U_0 порядка нескольких мегавольт.

Конструктивное решение формирующего устройства условно иллюстрируют рис. 2 б и 2с. Для создания развязывающего импеданса каждая последующая пара активной и пассивной линий повернута на 90° . Линии непосредственно переходят в кольцевые элементы I (рис. 2с), секционирующие ускорительную трубку, что обеспечивает равномерное распределение потенциала.

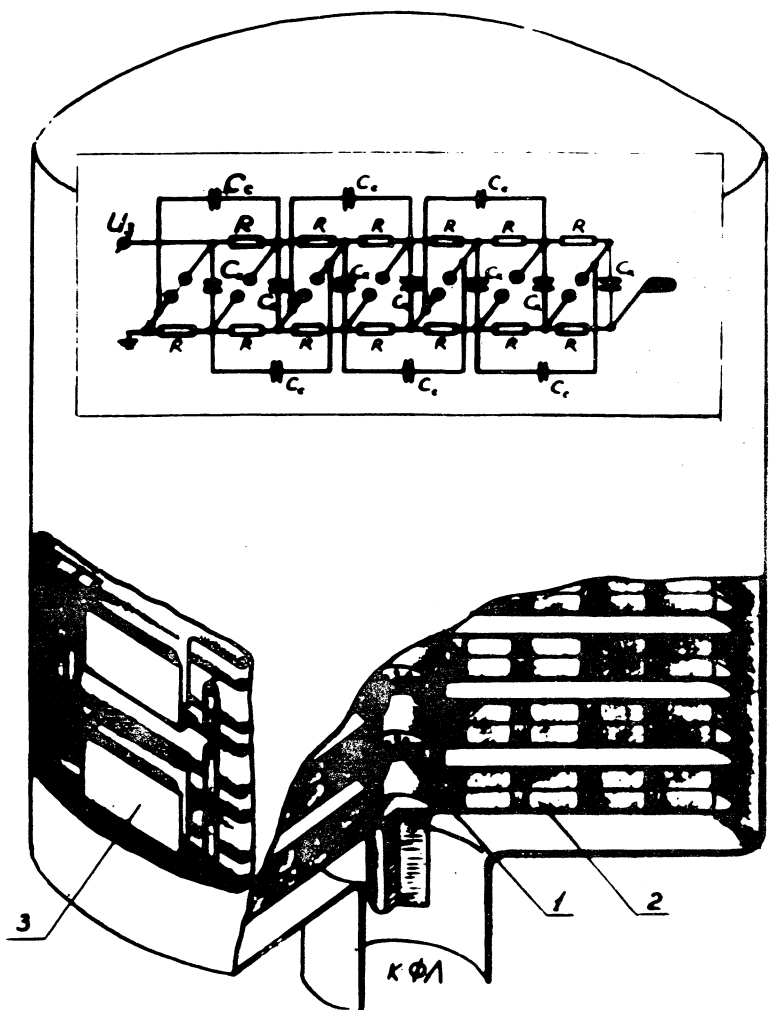
Для уменьшения напряженности электрического поля на поверхности секционированной ускорительной трубки предлагается изоляция из двух жидких диэлектриков с сильно отличающимися диэлектрическими постоянными (вода, $\epsilon = 81$ и масло, $\epsilon \approx 2$). При этом энергия электрического поля в объеме масла возрастает, что увеличивает развязывающий импеданс. Коммутация может быть осу-

ществлена одним разрядником. Однако представляется целесообразным коммутацию проводить в нескольких точках.



Р и с. 2. Генератор СВВ напряжения на полосковых линиях с одним коммутатором. а - принципиальная схема; б, в - ориентировочная конструкция генератора; 1 - кольца, секционирующие ускорительную трубку; 2 - изоляционные перегородки, разделяющие объемы, заполненные водой и трансформаторным маслом. $l \approx 170$ см; $b \approx 17$ см; $d_0 \approx 75$ см; $d_M \approx 110$ см; $\delta_0 \approx 90$ см; $\delta \approx 10$ см.

Рассмотрим в качестве примера электронный ускоритель с $E = 30$ Мэв, $I = 60$ ка и $\tau_n \approx 100$ нсек. Если принять, например, $U_0 \approx 2$ Мв, то количество линий $n = 40$ (при $k \approx 0,75$), длина линий $l \approx 170$ см, ширина линий $b \approx 17$ см, расстояние между полосками линий $\delta \approx 10$ см. Максимальная напряженность поля $E_m \approx 300$ кв/см, входная емкость $\sim 0,17$ мкф. Ориентировочные размеры - длина ~ 8 м и диаметр ~ 7 м. В качестве источника для импульсной зарядки линий представляется целесообразным использовать ГИН по схеме Аркадьева-Маркса (рис. 3). ГИН должен обеспечить зарядку фор-



Р и с. 3. Принципиальная схема и ориентировочная конструкция генератора импульсных напряжений. 1 - разрядники; 2 - конденсаторы; 3 - емкости связи.

мирующего устройства в течении ≤ 1 мксек. Для уменьшения индуктивности ГИНа следует использовать максимально высокое зарядное напряжение (~ 200 кв); объем, занимаемый конденсаторами 2, заполнить маслом; разрядники 1 поместить в атмосферу сжатого газа, и между каскадами включить емкости связи 3. Ориентировочные размеры ГИНа: длина ~ 5 м, диаметр ~ 5 м.

Поступила в редакцию
3 января 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. F. Winterberg. Phys. Rev., 174, 212 (1968).
2. О. В. Богданкевич, А. А. Рухадзе. Письма в ЖЭТФ, 13, 517 (1971).
3. R. Pay. Technology week, 20, N1,10 (1967).
4. Е. К. Завойский. Атомная энергия, 14, 57 (1963).
5. Н. Г. Басов, О. В. Богданкевич, А. Г. Девятков. ЖЭТФ, 47, 588 (1964).
6. В. И. Векслер и др. Proc. of 6-th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge, 1957, p. 289.
7. F. M. Carbonnier et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-14, N3, 789 (1967).
8. S. E. Graybill, S. V. Nablo. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-14, N3, 782 (1967).
9. W. T. Link et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-14, N3, 777 (1967).
10. T. H. Martin et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-16, N3, 59 (1969).
11. I. I. Clark et al. IOth Simp. Electron. Ion and Laser Beam Technology, Gaithersburg, May 1969, San Francisco Press.
12. I. Rander et al. Phys. Rev. Letts., 24, 283 (1970).
13. О. З. Загороднов и др. ПТЭ, № 5, 100 (1970).
14. О. П. Печерский и др. ДАН, 192, 1266 (1970).
15. I. M. Vitkovitsky. Proceedings of the 6th Symposium on Fusion Technology, Aachen, Sept. 22-25, 1970, Luxemb., December, 1970.

16. Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. В. Кремнев. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. Изд. "Энергия", Москва, 1970 г.
17. Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман. АЭ, 23, 44 (1967).
18. R. A. Fitch, W. T. S. Nowell. Proc. IEE, 111, N4, 849 (1964).