

Новый оптический элемент для формирования нейтринных пучков

В.М. Андросенко, К.М. Булгаков, П.И. Галкин, В.П. Карташев, Е.Н. Ломакин,
В.П. Панов, Б.В. Просин, А.В. Харламов, Ю.С. Ходырев
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Рассматривается новый магнитооптический элемент — токовая коаксиальная линза (ТКЛ) для формирования нейтринных пучков. Проводник прямого тока ТКЛ, создающий магнитное поле, набран из коаксиальных цилиндрических тонкостенных трубок; массивный проводник обратного тока, ограничивающий магнитное поле, является силовым каркасом.

В качестве примеров рассматривается использование ТКЛ для формирования нейтринных пучков с мягким и узким спектрами, приводятся результаты расчетов переходных токовых характеристик, механических напряжений и тепловых нагрузок ТКЛ.

Введение. Важным требованием к нейтринным пучкам является достижение предельно высокой интенсивности, что обуславливает необходимость использования аксиально-симметричных фокусирующих элементов при формировании пучков вторичных частиц — родителей нейтрино. Такими хорошо известными элементами являются горны [1], параболические [2] и литиевые [3] линзы.

Различают нейтринные пучки с широким, узким и мягким энергетическими спектрами. Особенно сложную проблему представляет создание нейтринных пучков с узким спектром, когда необходим анализ вторичных частиц по импульсам (и, следовательно, малые размеры пучка после первого фокусирующего элемента) и предельно короткий начальный участок (от мишени до первого поворотного магнита), который в основном определяет фон в спектре нейтрино на детекторе. При этом режим работы первого фокусирующего элемента является достаточно жестким как для литиевой линзы (из-за недостаточно малой плотности лития 0.53 г/см^3 и скин-эффекта), так и для горна (из-за наличия шейки в токовой монооболочке).

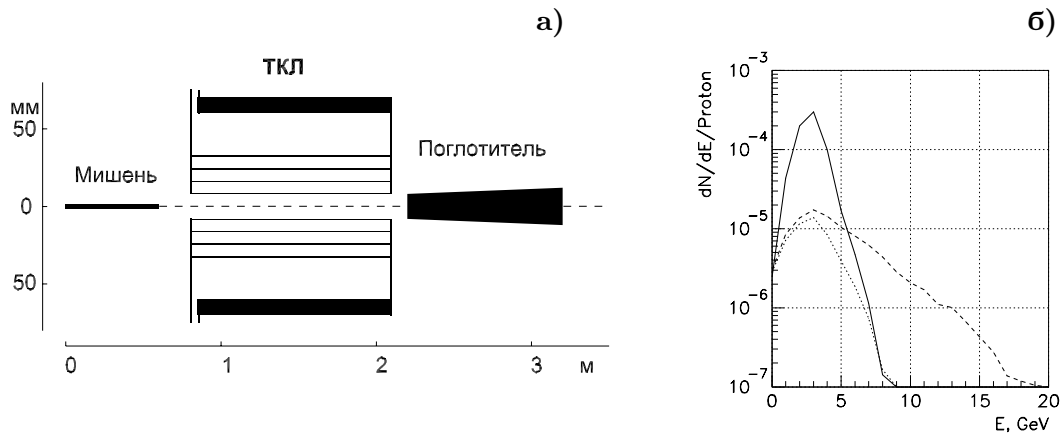


Рис. 1: Оптическая схема (а); нейтринные спектры (б) (пунктир — естественный сбор, точки — с поглотителем, сплошная линия — с ТКЛ и поглотителем).

ТКЛ может найти применение как в качестве первого (наиболее проблемного), так и последующих фокусирующих элементов. Использование ТКЛ проиллюстрировано на двух примерах: в качестве первого фокусирующего элемента для формирования нейтринного

пучка с мягким спектром при энергии первичных протонов 70 ГэВ (см. рис. 1) и в качестве первого фокусирующего (ТКЛ.1) и второго корректирующего (ТКЛ.2) элементов для формирования нейтринного пучка с узким спектром по прямой схеме (с четырехмагнитной системой для анализа по импульсам) при энергии первичных протонов 120 ГэВ и энергии вторичных частиц 45 ГэВ (см. рис. 2). Оптимизированные по спектрам параметры ТКЛ.1 и ТКЛ.2 приведены в табл. 1 и 2.

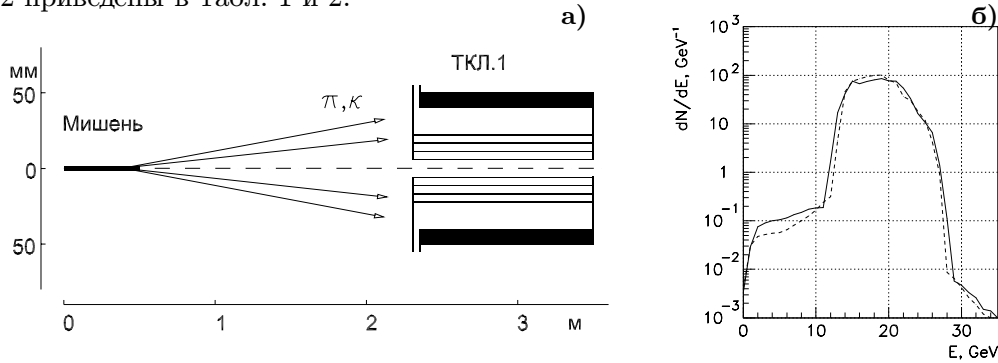


Рис.2. Начальная часть оптической схемы (а); нейтринные спектры (б) (пунктир — с литиевой линзой, сплошная линия — с ТКЛ).

Таблица.1. Основные параметры ТКЛ.1 ($l = 1.2$ м)

Номер трубки	r мм	δr мм	I кА	$p_{кр}$ МПа	p МПа	p_t МПа	dQ/dt Дж/мс	dT/dt К/мс
1	5.5	0.50	13.2	18.59	0.08	0.99	1.07	9.0
2	11.0	0.55	28.5	3.28	0.20	4.10	1.18	9.0
3	16.5	0.60	46.4	1.28	0.34	9.67	1.28	9.0
4	22.0	0.65	66.8	0.69	0.52	18.06	1.39	9.0

Таблица.2. Основные параметры ТКЛ.2 ($l = 0.5$ м)

Номер трубки	r мм	δr мм	I кА	$p_{кр}$ МПа	p МПа	p_t МПа	dQ/dt Дж/мс	dT/dt К/мс
1	17.5	0.60	17.1	1.083	0.014	0.44	0.31	2.1
2	35.0	0.70	39.6	0.219	0.037	1.89	0.36	2.1
3	52.5	0.80	67.8	0.097	0.070	4.65	0.41	2.1

Магнитное поле. По конфигурации магнитного поля в ТКЛ можно выделить три области: 1) без поля внутри первой трубки; 2) с квазипостоянным градиентом в области трубок (аналог литиевой линзы); 3) с полем $1/r$ вне трубок (как у горна). Градиенты магнитной индукции $G(r) = B(r)/r$ в ТКЛ.1 и ТКЛ.2 представлены на рис.3.

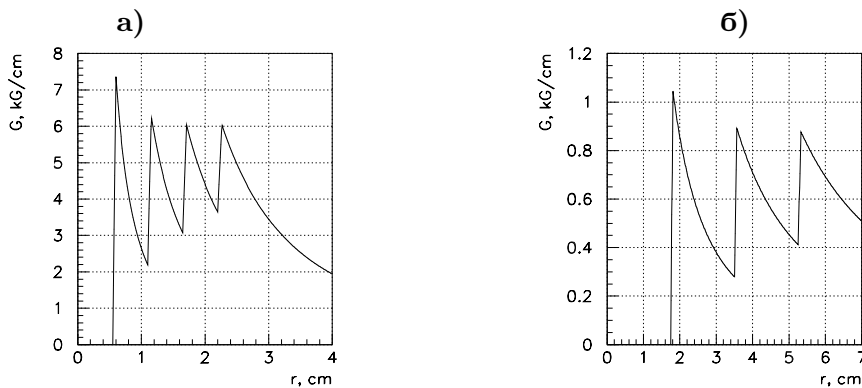


Рис. 3: Градиенты магнитной индукции в ТКЛ.1 (а) и ТКЛ.2 (б).

Скин-эффект. В силу слоистой структуры прямого проводника и, следовательно, большого среднего удельного сопротивления скин-эффект в ТКЛ подавлен, что позволяет существенно увеличивать ее радиус по сравнению с литиевой линзой. Переходные характеристики при подаче напряжения $U(t)$ ($U = 0$ при $t < 0$) описываются системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= [R_2 I_2 - R_1 I_1] / (L_{11} - L_{21}), \\ \dot{I}_2 &= [R_3 I_3 - R_2 I_2 - (L_{21} - L_{31}) \dot{I}_1] / (L_{22} - L_{32}), \\ \dot{I}_3 &= [R_4 I_4 - R_3 I_3 - (L_{31} - L_{41}) \dot{I}_1 + (L_{32} - L_{42}) \dot{I}_2] / (L_{33} - L_{43}), \\ \dot{I}_4 &= [U(t) - R_0 (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) - R_4 I_4 - \\ &\quad (L_0 + L_{41}) \dot{I}_1 - (L_0 + L_{42}) \dot{I}_2 - (L_0 + L_{43}) \dot{I}_3] / (L_0 + L_{44}),\end{aligned}$$

где R_0 и L_0 — сопротивление и индуктивность подводящей цепи; R_i и L_{ij} — сопротивления и индуктивности системы трубок, причем

$$L_{ij} = \mu_0 \frac{l}{2\pi} \ln \frac{r_{обп}}{r_{\max\{i,j\}}},$$

где μ_0 — магнитная постоянная; l — длина трубок; r_i и $r_{обп}$ — средние радиусы трубок и обратного проводника; при нулевых начальных условиях $I_1, I_2, I_3, I_4|_{t=0} = 0$.

Система уравнений легко приводится к нормальной системе уравнений последовательным исключением производных в правых частях уравнений: первое уравнение уже имеет нормальную форму, второе уравнение приводится к нормальной форме исключением производной в правой части с помощью первого уравнения и т.д. Согласно этой системе уравнений производные токов во внутренних трубках в начальный момент времени также равны нулю $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3|_{t=0} = 0$, а производная тока во внешней трубке в начальный момент времени прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сумме индуктивностей подводящей цепи и самой трубки $\dot{I}_4|_{t=0} = U(0)/(L_0 + L_{44})$. Приведенная система уравнений легко распространяется на произвольное число трубок.

Из переходных характеристик на рис.4 видно (полный ток достигает стационарного состояния практически в тот момент, когда достигает своего максимального значения ток во внешней трубке), что время перераспределения токов в трубках занимает 0.3 - 0.4 мс (в расчетах принято $U(t) \equiv 10$ кВ, $L_0 = 0.5$ мкГн). Расчеты, выполненные с учетом реальной (конечной по длительности) зависимости $U(t)$, подтверждают эти выводы.

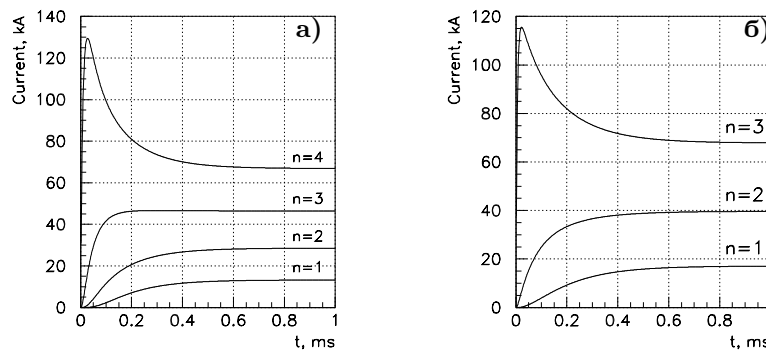


Рис.4. Переходные характеристики в ТКЛ.1 (а) и ТКЛ.2 (б).

Механические напряжения. В табл. 1 и 2 приведены радиальные p и тангенциальные $p_t = p \cdot r / \delta r$ напряжения в трубках, вызванные действием электромагнитных сил в установившемся режиме. Напряжения эти не создают каких-либо прочностных проблем (предел текучести для алюминиевых сплавов 340 МПа).

Более критическим является потеря радиальной устойчивости (смятие) трубок. Значения критических напряжений для трубок также приведены в табл. 1 и 2, из которых видно, что радиальные напряжения во внешних трубках близки к критическим. Однако конструкция ТКЛ позволяет повысить устойчивость внешних трубок, например, увеличением толщины стенок, введением ребер жесткости, созданием внутреннего давления.

Тепловые нагрузки. В табл. 1 и 2 приведены мощности энерговыделения dQ/dt в элементах трубок объемом $\Delta V = \delta r \cdot \text{см}^2$ и скорости приращения температуры dT/dt в установившемся режиме. При этом мощности энерговыделения в ТКЛ.1 и ТКЛ.2 составляют 3.10 и 1.27 кДж/мс соответственно (в расчетах принято $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$, $c = 0.88 \text{ Дж/г/К}$, $\rho_{эл} = 4.0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для ТКЛ.1 и $\rho_{эл} = 8.0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для ТКЛ.2).

Малая толщина трубок и продольная однородность и “прозрачность” ТКЛ существенно упрощают проблему охлаждения.

Заключение. Рассмотренный в данной работе новый оптический элемент по фокусирующим свойствам аналогичен литиевой линзе. Основными достоинствами этого элемента являются:

- малая средняя плотность вещества в пучке (порядка 0.1 г/см^3), что позволяет создавать ТКЛ достаточно большой длины (до 1.0 – 1.5 м), снижая при этом ток (до 130 – 170 кА);
- в силу слоистой структуры прямого проводника и, следовательно, большого среднего удельного сопротивления скин-эффект в ТКЛ подавлен, что позволяет создавать ТКЛ с достаточно большими апертурами (до 140 мм диаметром в приведенных примерах);
- однородность и “прозрачность” конструкции в продольном направлении, что упрощает проблему охлаждения;
- большое число параметров (количество, шаг, толщина, длина, материал трубок), позволяющих проводить оптимизацию по спектрам и, что особенно важно, варьировать зависимость $G(r) = B(r)/r$.

В настоящее время изготовлена упрощенная модель ТКЛ, имеющая лишь две трубки прямого тока. Первая (внутренняя) трубка имеет поперечное сечение, равное суммарному поперечному сечению первых трех трубок ТКЛ.1, а вторая (наружная) — параметры четвертой трубки. В ходе стендовых испытаний предполагается исследовать электромеханическое поведение этой трубки, как наиболее нагруженной, при разных режимах работы и способах крепления.

Список литературы

- [1] S. Van der Meer. A deflective device for charged particles and its use in an enhanced neutrino beam. Preprint CERN 61-7. Geneva. 1961.
- [2] В.Л. Ауслендер и др. Труды IV Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Москва. 1964, с.282.
- [3] Г.И. Сильестров. Проблемы получения интенсивных пучков вторичных частиц. Труды XIII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Новосибирск. 1986. т.2, с.258.