

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю.С. Павлов, В.В. Доброхотов, О.Н. Непомнящий

Известные оптические способы измерения параметров тока пучка основаны на получении и регистрации черенковского, флуоресцентного, переходного, тормозного, спонтанного и других видов излучений светового и рентгеновского диапазонов, возникающих при движении заряженных частиц в различных средах (в воздухе, жидкостях, кристаллах, в вакууме при наличии остаточных газов, газах под давлением, сцинтилляторах и т.д.). Поэтому такие способы измерений являются "непрозрачными" или "полупрозрачными" для исследуемого пучка и значительная часть пучка тратится на создание анализирующего излучения. Способы связанные с анализом синхротронного и ондуляторного излучений требуют установки специальных магнитных устройств изменяющих траекторию пучка, что приводит к "возмущению" и потерям тока исследуемого пучка.

Для развития радиационной химии требуются детекторы нового поколения: позволяющие получать сигналы для запуска экспериментальных устройств и анализа экспериментальных данных без возмущения мощных электронных пучков. Детекторы должны быть сверхбыстродействующими, помехозащищенными и обладать высокой чувствительностью. Все ранее созданные детекторы по совокупности параметров не обладают сформулированным требованиям. В мощных пучках происходит "выгорание" черенковских, флуоресцентных, рентгеновских и других "не прозрачных" детекторов.

Современные мощные электронные пучки требуют создания принципиально новых подходов в методологии построения измерительных схем. Авторами предлагается новый класс измерительных приборов под общим названием "электрооптические датчики параметров тока пучка заряженных частиц". Новые приборы обладают рекордной чувствительностью и помехозащищенностью при измерении параметров пучка заряженных частиц (формы, амплитуды и положения импульсов тока пучка) и не имеют отечественных и зарубежных аналогов.

В докладе приведены основные данные расчетов, конструирования и внедрения новых датчиков для экспериментальных исследований на мощных электронных ускорителях. Электрооптические датчики устанавливаются на линейных ускорителях для проведения экспериментальных исследований в области радиационной химии, физики и биологии [1-8]:

- У-003М (Институт физической химии РАН)
- Мальва-2 (НИИ импульсной техники)
- С-31 (Московский радиотехнический институт)
- Инжекторный стенд (Московский радиотехнический институт)
- У-28 (Московский инженерно-физический институт)

Предложена классификация оптических методов измерения параметров мощных электронных пучков:

1-е поколение - регистрация черенковского, флуоресцентного, переходного, тормозного, спонтанного и других видов излучений светового и рентгеновского диапазонов, возникающих при движении заряженных частиц в различных средах.

2-е поколение - анализ синхротронного, спонтанного, ондуляторного излучения и комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке.

Авторы предлагают новые детекторы 3-го и чрезвычайно перспективного поколения: электрооптические модуляционно-полевые детекторы для измерений параметров пучков - модуляционно-оптический детектор (на основе эффекта Франца-Келдыша); электрооптический детектор (эффект Погкельса) и магнитооптический детектор (эффект Фарадея). Детекторы отличаются рекордным временным разрешением, высокой чувствительностью при практически полном исключении электромагнитных наводок и искажений сигналов.

В модуляционно-оптических детекторах изменение поглощения света происходит в чистых, слабо- и сильнолегированных полупроводниках, помещенных в электрическое поле электронного пучка, для межзонного, примесного и экситонного механизмов поглощения света. Это происходит из-за сдвига длинноволнового края собственного поглощения в электрическом поле в соответствии с эффектом Франца-Келдыша. Интенсивность света $I_{ДЕТ}$ прошедшую через полупроводниковый тонкопленочный световод, помещенный в электрическое поле пучка, определяется по формуле:

$$I_{ДЕТ} = I_0 \cdot \exp \left\{ -L \cdot \left[\frac{8\pi R \varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{2m^*}}{3e\hbar\rho} (W_g - \hbar\omega)^{3/2} \right] \right\}$$

где: ω - частота анализирующего светового излучения лазера; W_g - ширина заряженной зоны полупроводникового тонкопленочного световода; m^* - изотропная эффективная масса носителей в полупроводнике; \hbar - постоянная Планка; ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводникового световода; ε_0 - электрическая постоянная; e - заряд электрона; R - расстояние от пучка до полупроводникового тонкопленочного световода; ρ - линейная плотность заряда в пучке заряженных частиц, движущихся по оси датчика; L - длина световода помещенного в электрическое поле пучка, I_0 - интенсивность светового излучения на входе датчика. На рис. 1 приведена конструкция и схема работы детектора.

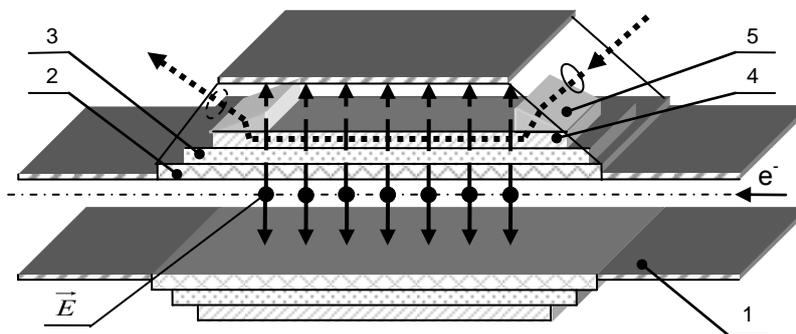


Рис. 1. Модуляционно-оптический детектор:
 1 – корпус; 2 – керамический электропровод;
 3 – подложка в виде окисного слоя; 4 – полупроводниковый тонкопленочный световод; 5 – кварцевая призма.

Световое излучение от лазера пропускается по полупроводниковым тонкопленочным световодам 4, расположенным параллельно направлению исследуемого пучка заряженных частиц. От пучка возникает \vec{E} электрическое поле, под воздействием которого происходит модуляция интенсивности света, проходящего через полупроводниковые световоды. Амплитуда модуляции света определяется напряженностью электрического поля, которая зависит от тока и положения пучка. С помощью фотохронографа по величине интенсивности света на выходе полупроводникового световода регистрируют параметры исследуемого пучка. Величина смещения положения пучка определяется путем сравнения интенсивностей света на выходах двух световодов.

Установка модуляционно-оптической системы измерений на линейном ускорителе электронов У-003М показана на рис. 2.

Схема детектора содержит только оптически связанные тонкопленочные и волоконные световоды и не содержит дополнительных оптических анализаторов и поляризаторов, что делает схему практически прозрачной для анализируемого светового излучения и, следовательно, увеличивается чувствительность измерений.

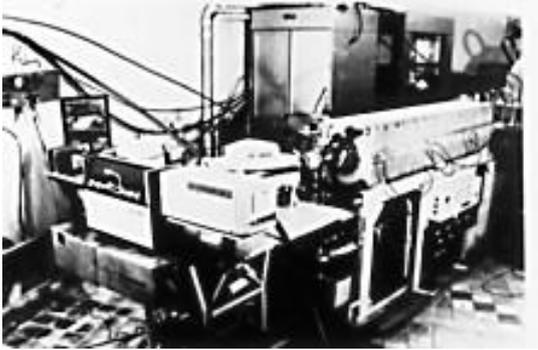


Рис. 2. Установка модуляционно-оптической системы измерений на линейном ускорителе электронов У-003М.

На полученной фоторегистрограмме регистрируется форма импульса, длительность фронта и среза, период повторения сгустков в микроструктуре импульса, амплитуда сгустков и другие параметры (рис. 3,4).

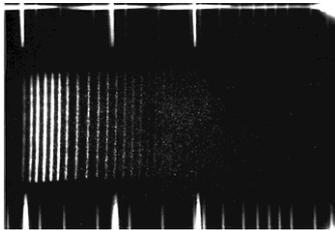


Рис. 3. Фоторегистрограмма наносекундного импульса тока пучка

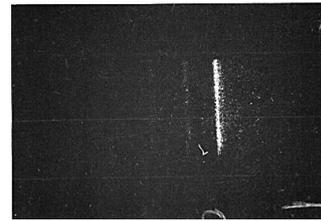


Рис. 4. Фоторегистрограмма пикосекундного импульса тока пучка

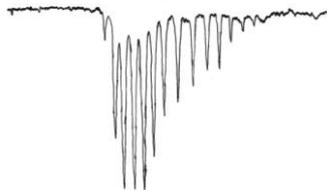


Рис. 5. Микроденситограмма наносекундного импульса тока пучка (2 нс, 30 А)

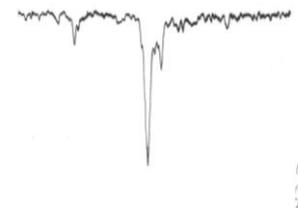


Рис. 6. Микроденситограмма пикосекундного импульса тока пучка (40 пс, 100 А)

Используемый в датчике оптический полупроводниковый тонкопленочный световод из арсенида галлия имеет затухание 3 дБ/см на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм. Световод выполнен на монокристалле p^+ -типа с нанесенной на него пленкой двуокиси кремния толщиной около 0,3 мкм. На окисную пленку после вытравливания в ней прямоугольного отверстия методом химического осаждения из паровой фазы наносится монокристаллический слой GaAs n^- -типа. При этом рост пленки начинается в вытравленном окне, после чего она наращивается поверх окисной пленки. В верхнем эпитаксиальном слое по стандартной технологии вытравливается гребенчатая структура световода высотой 0,5 мкм и толщиной 6 мкм. Нижней стенкой световода, ограничивающей распространение света, является скрытый слой двуокиси кремния, верхней и боковыми - поверхность раздела GaAs - воздух.

Связь между передающим волоконным световодом с низким показателем преломления (для кварца $n = 1,54$) и полупроводниковым тонкопленочным световодом из материала с высоким показателем преломления (для арсенида галлия $n = 3,34$) осуществляется на основе использования спадающих волновых полей, которые

перекрываются в области, содержащей фазовую дифракционную решетку. Эффективная апертура связи выбрана с учетом уменьшения дифракционного расхождения пучка в пленке. Эффективность ввода излучения более 86% при использовании обратноволновых решеток с повышенным отражением.

Кроме арсенида галлия для изготовления полупроводникового тонкопленочного световода, использованы гетероэпитаксиальные структуры типа GaAs /Al_x Ga_{1-x} / n⁺- GaP, которые работают при малых напряженностях электрических полей в широком диапазоне частот, обеспечивают жесткость конструкции и хороший теплоотвод.

Показанные на рис. 5 и 6 микроденситограммы получались путем обработки фотопленок на микрофотометре ИФО-451. Поперечный размер щели микрофотометра устанавливался равным 1,5 мм, что соответствует размеру 75 мкм на фотопленке. Продольный размер щели микрофотометра устанавливался 15 мм. Зарегистрированный предимпульс не превышает 10% от амплитуды основного и находится на расстоянии 400 пс от основного. Послеимпульсы отсутствуют.

Положительный эффект от применения модуляционно-оптического датчика заключается в полном отсутствии возмущений и потерь в исследуемом пучке, что позволяет увеличить точность измерений. Увеличение временного разрешения достигается за счет использования для модуляции света безынерционного полевого эффекта Франца-Келдыша. Время нарастания сигнала в преобразователе менее 10⁻¹³ с.

Электрооптический детектор тока пучка основан на эффект Поккельса, который линейно зависит от приложенного электрического поля и практически безынерционен, позволяет перенести процесс, измерений параметров электронного сгустка в оптический диапазон длин волн. Величина интенсивности светового излучения, прошедшего сквозь оптическую систему регистрации в момент пролета сгустка электронов, определяется по формуле:

$$I_{\text{Дет}} = I_0 \cdot \sin^2 \cdot \frac{\pi n_o^3 r_{63} E_z L}{\lambda_o}$$

где λ_o - длина волны света; n_o - показатель преломления кристалла; r_{63} - электрооптический коэффициент кристалла; E_z - напряженность электрического поля в коаксиале датчика; L - длина кристалла; I_0 - интенсивность анализирующего излучения.

На рис. 7 приведен схематический чертеж электрооптического детектора.

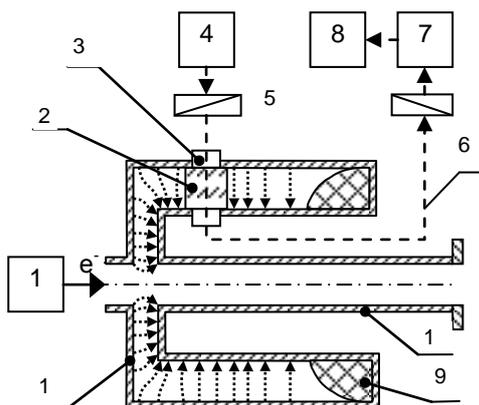


Рис. 7. Конструкция электрооптического детектора: 1 – ускоритель; 2 – электрооптический кристалл; 3 – оптический разъем; 4 – источник света; 5 - поляризатор; 6 – световод; 7, 8 – фото-хронограф и регистратор; 9 – ВЧ-нагрузка; 10 – коаксиал; 11 – электропровод.

Когда сгусток пересекает емкостной зазор полого коаксиала электромагнитные поля, связанные с сгустком, расширяются и передаются по коаксиальной линии в направлении пучка со скоростью света. Результирующая электромагнитная волна типа ТЕМ, пройдя коаксиал поглощается в согласованной ВЧ-нагрузке из поглощающей твердой высокочастотной керамики.

Проходя вдоль коаксиала электромагнитная волна возбуждает в кристалле продольное электрическое поле, параллельное оптической оси кристалла, и кристалл становится двулучепреломляющим. В момент прохождения электронного сгустка через емкостной зазор коаксиала происходит поворот плоскости поляризации проходящего через кристалл светового излучения. Для обнаружения этого оптического эффекта в оптическую систему введены два поляризатора с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Поэтому в промежутке между электронными сгустками свет не проходит от источника света в систему регистрации. Свет пропускается оптической системой лишь в момент прохождения сгустка через емкостной зазор коаксиала. Таким образом исследуя фоторегистрограммы можно измерять параметры электронного сгустка. Интенсивность прошедшего через оптическую систему светового излучения пропорциональна величине заряда сгустка. Введение оптического кристалла в полость коаксиала позволяет осуществить экранировку от внешних электромагнитных полей. Высокая помехозащищенность выгодно отличает электрооптический датчик от известных, что позволяет проводить прецизионные измерения малоинтенсивных импульсов короткой длительности.

Для электрооптического кристалла дигидрофосфата аммония ($\text{ADP} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$); $n_0=1,52$; $r_{63} = 8,5$. При $\lambda_0=550$ мкм, $L = 50$ мм, $I_0 = 10$ Вт/см², $E_z = 1$ В/см интенсивность излучения, прошедшего через оптическую систему на вход регистрирующей аппаратуры равна $I_{\text{дат}} = 4 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². Такой величины интенсивности вполне достаточно для регистрации излучения на электронно-оптических преобразователях которые обладают чувствительностью до $10^{-11} - 10^{-13}$ Дж/см².

Измерение формы пикосекундных импульсов тока пучка проводилось с помощью электрооптического детектора с измерением параметров световых импульсов на фотохронографической электроннооптической камере типа "Агат СФ" с мультищелочным входным фотокатодом. Транспортировка света от детектора к камере осуществлялась двумя способами. В одном из них камера устанавливалась на расстоянии 40 см от датчика непосредственно в ускорительном бункере. В другом случае свет транспортировался с помощью оптической системы из зеркал и объективов на расстояние примерно 10 м и через отверстие в бетонной защите выводился из ускорительного бункера. В этом случае возможна визуальная настройка регистрирующей камеры, но при транспортировке света неизбежны потери в интенсивности. Наиболее эффективный для детектора Поккельса – кристалл фосфида Галлия. В качестве материалов с ярко выраженным электрооптическим эффектом в детекторах используются ниобат и танталат лития и твердые растворы на их основе. Тонкие пленки из этих материалов позволяют получать в них электрооптические коэффициенты такие же, как и в объемных материалах.

Электрооптические спиральные детекторы. Основным недостатком рассмотренных электрооптических детекторов является невозможность прецизионных измерений параметров нерелятивистских электронных пучков и "медленных" ($\beta \ll 1$) пучков протонов и тяжелых ионов. В этих случаях для эффективной работы электрооптического детектора необходима синхронизация фазовой скорости электромагнитного поля, связанного с пучком, и групповой скорости световой волны, распространяющейся коллинеарно в электрооптической среде. Для электронных пучков такой синхронизм достигается выбором типа электрооптического кристалла, для которого выполняется условие:

$$v_{\text{ф пучка}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{c}{n} = v_{\text{грсвета}} \quad \text{где: } \epsilon - \text{ диэлектрическая проницаемость среды; } c - \text{ скорость света; } n - \text{ оптический показатель преломления.}$$

В случае нерелятивистских пучков добиться равенства величины $\sqrt{\epsilon}$ и n выбором среды, при сохранении высокой чувствительности и временного разрешения, не удастся.

Целью разработки нового преобразователя являлось повышение чувствительности за счет увеличения длины взаимодействия создаваемой пучком электромагнитной волны, со

световой волной, пропускаемой в кристалле, а также возможность измерения параметров пучков протонов и тяжелых ионов с помощью оптических методов. Преобразователь светового излучения выполнен в виде спирального волоконного световода с полным внутренним отражением, расположенным соосно с направлением распространения исследуемого пучка, причем сердечник световода выполнен из кварца, обладающего сильным линейным электрооптическим эффектом. Шаг спирали и размер витка спирального световода выполнен так, чтобы обеспечить синхронизацию между фазовой скоростью электромагнитного поля (от пучка) и групповой скоростью света, пропускаемого через световод. Длина спирального волоконного световода определяется по формуле:

$$L_{\text{спирали}} = n \sqrt{(2\pi R)^2 + h^2}$$

где n – число витков спирали;
 R – радиус витка спирали; h – шаг спирали.

Схема включения спирального детектора представлена на рис. 8.

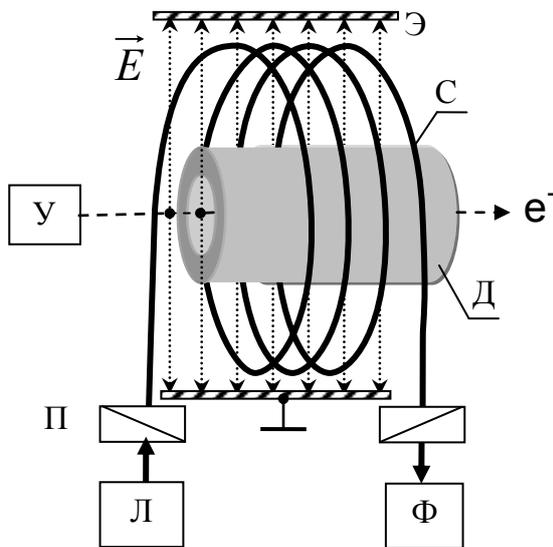


Рис. 8. Электрооптический спиральный детектор. С – электрооптический световод; Д – корпус детектора; Ф – фотохронограф; У – ускоритель; Л – лазер; П – поляризатор; Э – экран

Детектор состоит из преобразователя светового излучения, представляющего собой спиральный волоконный кварцевый световод с полным внутренним отражением С, через который пропускается световое излучение от источника Л и расположенного соосно с исследуемым пучком от ускорителя У. Световод располагается между системой скрещенных поляризаторов П. Световое излучение, промодулированное электрическим полем в световоде регистрируется измерительной аппаратурой Ф (фоторегистратор типа "Агат").

На рис. 9 показаны микроденситограммы электронных пучков с детектора в процессе настройки систем формирования ускорителя С-31.

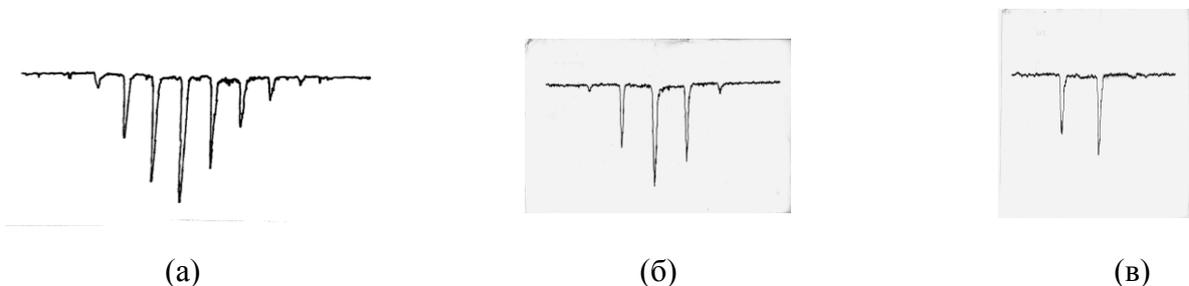


Рис. 9. Микроденситограммы пикосекундных импульсов (а - 5 сгустков; б - 3 сгустка; в - 2 сгустка). Период следования сгустков в импульсе 550 пс.

С помощью электрооптических спиральных детекторов можно измерять параметры пучков ионизирующего излучения со сравнительно малой проникающей способностью:

- сильноточных электронных пучков (СЭП) с энергией до 1 МэВ и током в несколько килоампер. Так, например, в процессе формирования микроструктуры СЭП, при группировке в сгустки и транспортировке СЭП через различные периодические гофрированные волноводы требуется постоянный неразрушающий контроль параметров пучка. Особенно важное значение придается регистрации формы микроструктуры импульсов тока пучка и измерению временных параметров импульсов – длительности фронта, среза, вершины, а также амплитуды отдельных микросгустков в импульсе тока СЭП.

- пучков многозарядных ионов с энергией в несколько десятков МэВ на нуклон. Прозрачные для пучка детекторы требуются для регистрации изменения параметров фазовой структуры внутреннего пучка ионного синхротрона в процессе набора энергии в цикле ускорения.

Схема магнитооптического детектора для измерения тока и положения пучка показана на рис. 10.

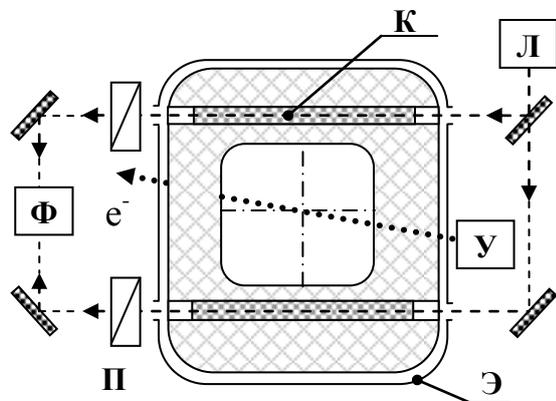


Рис. 10. Схема магнитооптического датчика для измерения тока и положения пучка.

К – кристалл; Л – лазер; П – поляриод, Ф – фотохронограф. У – ускоритель; Э – экранирующий кожух;

Плоскополяризованное световое излучение от лазера 3 через оптическую систему зеркал 7 и 8 попадает на кристаллы 5. Движущийся пучок заряженных частиц создает вокруг себя магнитное поле, которое индуцируется в магнитопроводе датчика. Действие магнитного поля пучка заряженных частиц на кристаллы 5 сводится к следующему: магнитное поле поворачивает угол плоскости поляризации светового излучения на определенный угол в случае, если направление силовых линий магнитного поля перпендикулярно оптической оси кристалла (эффект Фарадея). Величина поворота плоскости поляризации зависит от величины тока и положения пучка заряженных частиц. При измерении тока пучка достаточно использовать лишь один кристалл, а измерение положения требует использования двух кристаллов. При прохождении пучка точно по центру тороида положение кристаллов 5 должно быть выбрано так, что оптическая ось кристаллов 5 лежит в плоскости поляризации светового излучения от лазера 3. Положение поляриодов 9 выбирается так, что световое излучение не проходит через них (система скрещенных николей). Тогда при отклонении пучка от центра за счет магнитного вращения плоскости поляризации в кристаллах на систему регистрации поступают два сигнала интенсивностью I_1 и I_2 . Разность этих сигналов ΔI зависит от величины смещения положения пучка заряженных частиц от центра оси симметрии датчика. Величина ΔI рассчитывается по формуле:

$$\Delta I = I_{CBET} \left(\sin^2 \frac{dV\Phi_1}{s} - \sin^2 \frac{dV\Phi_2}{s} \right)$$

где: $I_{СВЕТ}$ – интенсивность светового излучения, падающего на каждый из кристаллов [Вт/см²]; d – толщина кристалла, м; S – площадь поперечного сечения ферромагнитного тороида, м²;

$$(V = \frac{a}{\lambda^2} + \frac{b}{\lambda^4}) - \text{постоянная Верде, [мин/Гл}\cdot\text{м]}$$

λ – длина волны светового излучения, м;

a, b – коэффициенты, зависящие от природы вещества и температуры;

Φ_1, Φ_2 – потоки магнитной индукции, действующие на кристаллы 1 и 2, [Вб],

причем : $\Phi = 0,2 \cdot I_{II} L \mu \ln \frac{r_1}{r_2}$; где I_{II} – ток пучка, [А]; длина магнитопровода, м;

μ – магнитная проницаемость ферромагнетика, [Тл/А·м]; r_1 и r_2 – расстояние от пучка до внешней и внутренней поверхности тороида, м.

Оценим величину ΔI , измеренную системой регистрации.

При $r_1 = 0,03$ м; $r_2 = 0,05$ м;

$\mu = 50$ (феррит марки 50 ВЧ); толщина ферритового тороида $h = 0,01$ м; $I_{II} = 100$ А;

$d = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $V = 28,2 \cdot 10^4$ мин/Гл·м, для кристаллов ZnS при 20°C и длине излучения $\lambda = 589$ нм; $I_{СВЕТ} = 1$ Вт/см²; величина смещения $\Delta r = 10^{-3}$ м. Тогда для ΔI получаем величину 10^{-8} Вт/см². В настоящее время измерение таких интенсивностей проводится с использованием электронно-оптической камеры "Агат-СФ", обладающей высокой чувствительностью по мощности и временным разрешением до 10^{-12} с.

Магнитооптический детектор позволяет измерять положение пучка относительно оси ускорителя и проводить прецизионное наведение выходного излучения на экспериментальные объекты. Оценка формы черенковских сигналов осуществлялась путем их передачи по кварцевому световоду длиной 10 м к оптическому осциллографу ОСО-2. Собственное разрешение световода около 10 пс, а осциллографа около 30 пс. Кроме этого датчик используется для регистрации нестабильности запуска инжектора относительно импульсов синхронизации с СВЧ-полем в ускорителе. Изображение профиля пучка передавалось на видеоконтрольное устройство с помощью телевизионной камеры с высокой чувствительностью и разрешающей способностью типа КТП-62.

С целью улучшения помехозащищенности ферритовый тороид помещен в экран из немагнитного материала. Увеличение чувствительности модернизированного детектора получено за счет использования метода многократного прохождения светового излучения через оптический элемент, для чего кристалл перемещается в оптический резонатор открытого типа.

При создании магнитооптических детекторов перспективен переход на тонкопленочные конструкции. В этом случае устраняется основной недостаток, свойственный детекторам с объемными ферритами, – низкая рабочая частота. Феррит-гранатовые модуляторы работают на частотах примерно 10^8 МГц и их чувствительность на порядок выше, чем у лучших образцов электрооптических детекторов.

Транспортировка света от электрооптических детекторов к электроннооптической камере осуществлялась двумя способами. В одном из них камера устанавливалась в непосредственной близости от детектора в ускорительном бункере. В другом случае свет транспортировался с помощью оптической системы из зеркал и объективов (или по световоду) на расстояние примерно 10 м и через отверстие в бетонной защите выводился из ускорительного бункера. В этом случае возможна визуальная настройка регистрирующей камеры, но при транспортировке света неизбежны потери в интенсивности.

Синхронизация играет исключительно важное значение для функционирования основных систем формирования мощных электронных пучков, при приведении экспериментальных исследований и для надежной регистрации параметров с помощью электрооптических детекторов. Экспериментально измеренная собственная нестабильность запуска оптического регистратора оказалась меньше 50 пс при синхронизации от

исследуемого сигнала. Временная нестабильность запуска схемы синхронизации $\Delta\tau_c \leq 40$ пс и остается меньше измеренной нестабильности регистратора.

На рис. 11 показан внешний вид выходных устройств и электрооптических детекторов на ускорителе "Мальва-2". Синхроимпульс запуска экспериментальных устройств и детекторов показан на рис. 12. Измерения проводились в режиме формирования пикосекундных импульсов с использованием различных типов разработанных детекторов. Сигналы от детекторов регистрировались с помощью быстродействующих фотоэлементов.

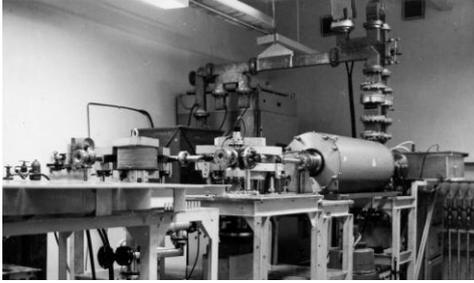


Рис. 11. Внешний вид выходных устройств и комплекс электрооптических детекторов на ускорителе "Мальва-2".

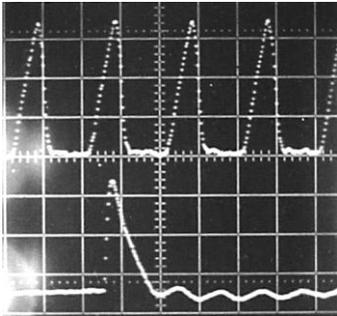
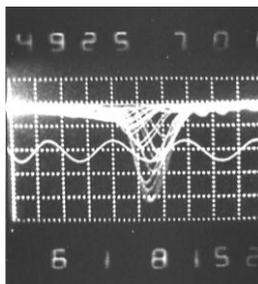
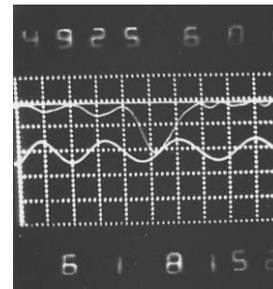


Рис. 12. Синхроимпульс запуска экспериментальных устройств и детекторов, "привязанный" к импульсу инжекции и СВЧ-напряжению ускорителя.

На рис. 13 показаны осциллограммы, полученные при исследовании нестабильности запуска инжектора относительно ускоряющего СВЧ-поля.



(а)



(б)

Рис. 13. Исследование нестабильности запуска инжектора относительно СВЧ-поля.

Рис. 13-а. Осциллограммы пикосекундных импульсов на выходе магнетронного ускорителя без схемы синхронизации. Ускоряющая частота 1887 МГц. Частота повторения импульсов 10 Гц. Время экспозиции 1 с.

Рис. 13-б. Осциллограмма пикосекундного импульса тока пучка на выходе ускорителя при включенной схеме синхронизации. Амплитуда тока пучка – 20 А/ дел. Период калибровочной синусоиды 1 нс.

Как видно из полученных осциллограмм разработанная схема синхронизации обладает минимальной нестабильностью и позволяет формировать стабильные по амплитуде и длительности импульсы с надежной повторяемостью от импульса к импульсу. Такая схема синхронизации была использована при испытании электрооптических детекторов на всех ускорителях.

Выводы. Открыт и изучен новый класс измерительных приборов под общим названием "электрооптические детекторы параметров тока пучка заряженных частиц". Разработаны, внедрены и исследованы детекторы параметров электронных пучков на эффектах Франца-Келдыша, Поккельса и Фарадея. Новые приборы обладают рекордной чувствительностью и помехозащищенностью при измерении параметров пучка заряженных частиц (формы, амплитуды и положения импульсов тока пучка) и не имеют отечественных и зарубежных аналогов.

Электрооптические детекторы позволяют получать объективные данные о параметрах радиационного процесса и работе всех узлов установки при полном исключении электромагнитных наводок, шумов в измерительной аппаратуре и искажений сигналов в радиочастотных кабелях. В этом случае исследователи могут "забыть" о таких неприятностях, как электронная "несовместимость" сигналов при одновременной работе различных радиоприборов.

Электрооптические детекторы естественным образом стыкуются с волоконно-оптическими линиями передачи. Возможна прямая передача информации от детектора на работающем ускорителе в офис экспериментатора в любой стране мира.

Электрооптические детекторы - ключ к полной компьютеризации ускорителя и экспериментальных устройств используемых для радиационных технологий, радиационно-химических и физических исследований.

Полученные результаты превосходят все известные методы измерений по совокупности следующих параметров: чувствительность, временное разрешение и помехозащищенность. Рассмотренные методы измерений и схемы регистрации открывают новый класс современной измерительной. Использование полученных результатов позволяет проводить ранее не доступные фундаментальные и прикладные экспериментальные исследования в области радиационной химии, физики и биологии.

1. Павлов Ю.С. Устройство для измерения длительности и заряда сгустков заряженных частиц. Авт. свид. СССР № 753339, 1981.

2. Павлов Ю.С. Системы формирования и метрики пикосекундных импульсов тока пучка на линейных ускорителях для изучения быстропротекающих процессов в радиобиологии и радиационной химии. - Докл. 4 Всес. Совещан. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Т. 2. Ленинград, НИИЭФА, 1982, с. 66-74.

3. Павлов Ю.С., Соловьев Н.Г. Формирование и измерение пикосекундных пучков заряженных частиц. Труды 8 Всес. совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2. Дубна, ОИЯИ, 1983, с. 63-67.

4. Павлов Ю.С., Соловьев Н.Г. Устройство для измерения параметров пучков заряженных частиц. Авт. свид. СССР № 859978, 1984.

5. Павлов Ю.С. Способ оптической регистрации параметров пучка заряженных частиц. Авт.свид. СССР № 1119467, 1985.

6. Павлов Ю.С. Датчик для регистрации корпускулярного излучения. Авт. свид. СССР № 1074258, 1985.

7. Доброхотов В.В, Павлов Ю.С. Оптическая метрика параметров пикосекундного электронного пучка. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования, вып. 5 (5). М., ЦНИИАтоминформ, 1989, с. 60-63.

8. A.K. Pikaev, P.Ya. Glazunov, Yu.S. Pavlov. Radiation centre of institute of physical chemistry in Moscow. Radiat. Phys. Chem., 1993, Vol. 42. Nos 4-6, pp. 887-890.