

Измерение энергии пучка электронов с помощью излучения Вавилова–Черенкова

Д. А. Бобылев^{1,2,*}, В. В. Ханкин^{1,2,†}, В. И. Шведун^{1,2,‡}

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ» (ООО «ЛЭУ МГУ»)
(Поступила в редакцию 02.02.2021, подписана в печать 07.06.2021)

В работе представлены результаты разработки и предварительных испытаний основанного на использовании излучения Вавилова–Черенкова прибора для оперативного контроля энергии выведенного в атмосферу ускоренного пучка электронов промышленного ускорителя, предназначенного для электронной обработки продукции.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq

УДК: 53.082.79, 621.384.6

Ключевые слова: ускоритель, излучение Вавилова–Черенкова, показатель преломления.

ВВЕДЕНИЕ

Применение ускоренных электронов для обработки продукции требует тщательного контроля энергии пучка: для многих процессов обработки недопустимо превышение энергии 10 МэВ, а для ускорителей с регулируемой энергией ее значение должно соответствовать оптимальной величине, определяемой поверхностной плотностью продукции. В соответствии с международными стандартами основным методом контроля энергии промышленных ускорителей с выведенным в атмосферу пучком является измерение распределения поглощенной дозы по глубине с использованием радиохромной пленки, проложенной между алюминиевыми пластинами или помещаемой в поглощающий алюминиевый клин. Данный метод весьма трудоемок и его использование при настройке и калибровке ускорителя существенно замедляет процесс.

В настоящей работе описаны предварительные результаты разработки прибора, основанного на измерении интенсивности излучения Вавилова–Черенкова от давления газа, позволяющего оперативно оценивать энергию пучка и ширину энергетического спектра. Поскольку в основе метода лежит фундаментальное физическое явление, имеющее пороговый характер, при правильном учете всех существующих факторов, сопровождающих процесс измерений, данный прибор не требует специальной калибровки с использованием других методов.

Объяснение этого явления было найдено в 1937 г. И. Е. Таммом и И. М. Франком [2], которые показали, что равномерно движущийся в среде заряд должен излучать свет, если его скорость превышает фазовую скорость света в этой среде.

По теории Франка–Тамма число фотонов ИВЧ, испускаемых частицей с зарядом ze и скоростью βc на единице пути в среде с показателем преломления n под углом θ к направлению движения частицы, в интервале частот $(\omega, \omega + d\omega)$, определяется выражением [3]:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \omega} = \frac{z^2 e^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) = z^2 \frac{\alpha}{c} \sin^2 \theta, \quad (1)$$

где α — постоянная тонкой структуры.

При практическом использовании эффекта Вавилова–Черенкова удобно проводить оценочные вычисления мощности ИВЧ. Так как основная энергия выделяется в диапазоне длин волн от 3500 Å до 7000 Å, то из выше приведенной формулы следует, что на 1 см пути частицей излучается число фотонов, определяемое формулой:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= z^2 \frac{\alpha}{c} \int_{7000}^{3500} \sin^2 \theta d\omega = \frac{\alpha z^2}{c} \overline{\sin^2 \theta} (\omega_{\min} - \omega_{\max}) = \\ &= 2\pi \alpha z^2 \overline{\sin^2 \theta} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) = 655 z^2 \overline{\sin^2 \theta}. \end{aligned} \quad (2)$$

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ИВЧ

Излучение Вавилова–Черенкова известно уже около ста лет, и за это время неплохо изучено [1]. Впервые оно было обнаружено в 1934 г. П. А. Черенко-

2. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ РАБОТЫ

В основе метода измерения энергии, изучаемого в данной работе, лежит пороговый характер ИВЧ. Принцип работы датчика энергии заключается в измерении зависимости интенсивности излучения при различных значениях показателя преломления газа, через который проходит пучок электронов, с целью нахождения порога появления ИВЧ [4–7]. Изменение показателя преломления n газа достигается путем изменения давления p газа в камере, причем зависимость

*E-mail: agava2309@yandex.ru

†E-mail: v-k32@yandex.ru

‡E-mail: shvedunov@gmail.ru

$n(p)$ с хорошей степенью точности можно считать линейной. Ожидаемая зависимость интенсивности ИВЧ от давления газа представлена на рис. 1.

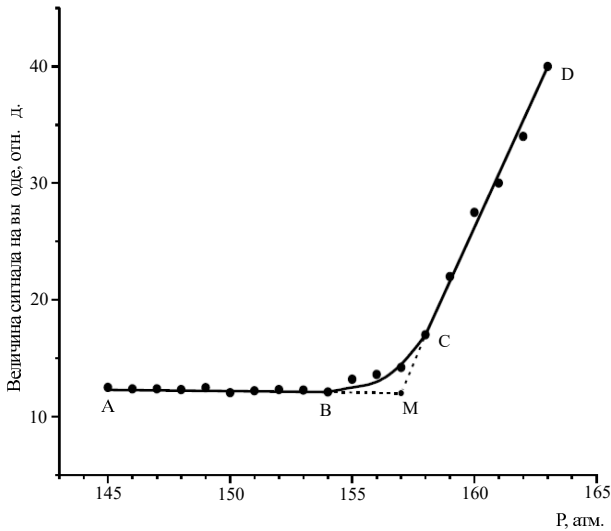


Рис. 1. Типичная зависимость интенсивности ИВЧ от давления газа в системе [4].

Зависимость состоит из 2 участков прямых АВ и CD, соединенных изгибом ВС. Горизонтальная прямая АВ соответствует малому давлению газа. ИВЧ на данном участке отсутствует, поскольку энергия электронов пучка меньше пороговой. На участке наклонной прямой CD наблюдается рост интенсивности ИВЧ — здесь энергии частиц пучка выше пороговой энергии. Можно показать, что зависимость интенсивности ИВЧ от давления на этом участке практически линейна. Изгиб ВС соответствует случаю, когда пороговая энергия близка к средней энергии электронов пучка и ИВЧ испускают лишь наиболее энергичные частицы пучка, энергия которых выше пороговой. Продолжая наклонную прямую CD до пересечения с горизонтальной АВ (пунктирные линии), можно найти давление в этой точке. По этому давлению рассчитывается показатель преломления, а так же пороговая энергия ИВЧ, которая приблизительно равна средней энергии пучка. Важно, что интенсивность других видов излучения, возникающих в подобной системе (например, переходного излучения) слабо зависит от давления и не влияет на результаты эксперимента [4].

3. ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ИВЧ

В ходе работы была сделана оценка мощности ИВЧ, испускаемого пучком электронов, проходящем через газ. От порядка данной величины зависит, каким образом следует проводить измерения, и возможны ли они в принципе.

Выше в формуле (2) было приведено оценочное зна-

чение числа фотонов, излучаемых черенковским электроном на 1 см пути:

$$\frac{dN}{dx} = 655z^2 \overline{\sin^2 \theta}. \quad (3)$$

Оценим мощность ИВЧ, создаваемого при прохождении пучка электронов от ускорителя через рабочую среду. Вспомним, что $\cos \theta = 1/(\beta n)$. ИВЧ появляется при пороговом значении скорости $\beta_{kr} = 1/n$. Таким образом, $\cos \theta = \beta_{kr}/\beta$. С другой стороны, как известно, $\beta^2 = 1 - (E_0/E)^2$, E_0 — энергия покоя электрона.

Соответственно, $\beta_{kr}^2 = 1 - (E_0/E_{kr})^2$. Учитывая, что ИВЧ идет в узком угловом интервале, получим

$$\overline{\sin^2 \theta} \cong 1 - \cos^2 \theta = 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} = 1 - \frac{\beta_{kr}^2}{\beta^2}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражения для β^2 и β_{kr}^2 , нетрудно получить, что

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= 655M, \\ M \equiv \overline{\sin^2 \theta} &= \frac{\Delta E}{E_{kr}} \frac{2 + \frac{\Delta E}{E_{kr}}}{\left(\frac{E}{E_0}\right)^2 - 1}, \\ \Delta E &= E - E_{kr}. \end{aligned} \quad (5)$$

Будем далее считать, что средняя энергия фотонов ИВЧ примерно равна 2 эВ.

Все эксперименты в ходе данной работы проводились на 10-МэВном ускорителе НИИЯФ МГУ, в одном импульсе которого содержится около $2 \cdot 10^{13}$ электронов (заряд 3.2 мкКл). Отсюда следует, что на каждом сантиметре пути пучка в виде ИВЧ излучается около 4.192 МДж энергии. Учитывая длительность импульса электронов (порядка 8 нс), получим среднюю мощность ИВЧ за время прохождения импульса: 524 МВт на каждый сантиметр пути.

Оценим параметр для разных энергий. Будем считать превышение над порогом незначительным, а $E_{kr}/E_0 = 20$.

Рассмотрим в качестве иллюстрации три случая:

Пусть $\Delta E/E_{kr} = 0.01$, тогда $M = 5 \cdot 10^{-5}$, а общая мощность ИВЧ равна 0.026 Вт (на сантиметр пути).

Пусть $\Delta E/E_{kr} = 0.05$, тогда $M = 2.6 \cdot 10^{-4}$, а общая мощность ИВЧ равна 0.13 Вт.

Пусть $\Delta E/E_{kr} = 0.1$, тогда $M = 5.3 \cdot 10^{-4}$, а общая мощность ИВЧ равна 0.28 Вт.

Вспышки ИВЧ такой мощности должны уверенно регистрироваться многими фотодиодами, а, значит, использование каких-либо сложных и дорогостоящих приборов для этих целей не требуется.

4. ВЫБОР ГАЗА

Выбор газа, который используется в качестве рабочего, является одним из важных этапов работы. Рабочий газ должен иметь такой показатель преломления,

чтобы пороговая энергия ИВЧ была близка к измеряемой при давлениях не слишком отличающихся от атмосферного [4]. Газ не должен менять химический состав при прохождении пучка электронов через него. Газ должен быть доступным, неядовитым, неагрессивным и т.д.

Среди множества известных газов немногие вполне удовлетворяют данным требованиям.

Так, не подходят газы, имеющие сложное строение, например, воздух, углекислый газ или элегаз (SF_6), т.к. они распадаются под действием пучка на отдельные атомы, которые, собираясь, создают новые вещества в неизвестных количествах. Примеси этих новых веществ, во-первых, изменяют показатель преломления газа в системе, и, во-вторых, могут негативно влиять на элементы самой установки. Так, при прохождении электронного пучка через элегаз, последний распадается и дает молекулярный фтор F_2 , который может разрушить элементы установки, содержащие стекло, например, линзы и фотодиод.

По причине высокой химической активности не подходят кислород, фтор и хлор. С точки зрения значения порогового давления, нужно учесть следующее.

Как известно, зависимость показателя преломления газа от давления с хорошей точностью является линейной и описывается следующей формулой:

$$n(p) = 1 + A_p p \quad (6)$$

Здесь $A_p = n_{atm} - 1$, где n_{atm} — показатель преломления газа при атмосферном давлении; давление всюду выражено в атмосферах. (Это выражение справедливо при не слишком высоких и не слишком низких давлениях.)

В то же время, пороговая скорость частицы (минимальная скорость, при которой возможна генерация ИВЧ) равна скорости света в среде и составляет $v_n = c/n$, где c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления газа в камере. Тогда пороговая энергия ИВЧ дается выражением

$$E_n = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta_n^2}} = n \frac{m_e c^2}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (7)$$

где m_e — масса электрона, $\beta_n = v_n/c$, а условие излучения электроном, обладающим энергией E (скоростью v): $E \geq E_n$, $v \geq v_n$.

Комбинируя выражения (6) и (7), нетрудно получить формулу для порогового давления:

$$p_n(E) = \frac{1}{A_p} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{m_e c^2}{E}\right)^2}} - 1 \right) \quad (8)$$

Из (8) следует, что чем меньше значение A_p , тем выше пороговое давление. Так как работа с высокими

давлениями связана с немалыми сложностями, нужно выбирать газы с как можно большими значениями A_p . По этой причине были отвергнуты гелий, водород (он, к тому же взрывоопасен) и неон. Криптон и ксенон теоретически можно использовать, однако, они относительно дорогие. Из распространенных газов остаются только два — азот и аргон. В ходе работы было решено использовать аргон, поскольку он, в отличие от азота, является инертным газом и не вступает в химические реакции. Далее речь будет вестись исключительно про аргон.

Известно, что для аргона показатель преломления равен 1.0002630, для $\lambda = 546.1$ нм (зеленый) и 1.0002618, для $\lambda = 632.8$ нм (красный) [8].

Из формулы (8) при энергии электронов, равной 10 МэВ, получим, что ИВЧ начнет появляться при давлении аргона более 5 атмосфер. Из формулы также ясно, что чем ниже энергия пучка, тем более высокое давление газа необходимо. Поскольку работа с давлениями выше 10 атмосфер вызывает уже существенные сложности, то в данной работе возможно измерять лишь энергии электронов более 7 МэВ. Верхняя граница измеряемых энергий появляется в результате необходимости разрезать газ в установке до давлений ниже атмосферного, что также проблематично. По формуле можно понять, что она равна примерно 20 МэВ.

5. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГАЗА

Известно, что газ в состоянии плазмы имеет показатель преломления, отличающийся от показателя в не ионизованном состоянии [9]. Под действием электронов, проходящих через газ, он обязательно ионизируется. Оценим, насколько сильно ионизация изменяет показатель преломления газа.

Пробег R электронов с энергией $E > 0.8$ МэВ в веществе с массовым числом A и зарядом ядра Z подчиняется закону $R(A, Z) = R(\text{Al})(Z/A)_{\text{Al}}/(Z/A)$, где $R(\text{Al}) = 0.54E - 0.133$ — пробег в алюминии в г/см² [10]. Пусть $E \approx 6$ МэВ. Тогда $R(\text{Al}) \approx 3.107$ г/см². Найдем R для аргона: $R(\text{Ar}) \approx 3.32$ г/см².

С учетом того, что $R = \rho L$, где ρ — плотность вещества, L — пробег в метрах, получим: $L(\text{Ar}) \approx 21$ м. Будем считать для простоты, что вся энергия электронов расходуется на данных расстояниях равномерно. Тогда на участке длины l электроны потеряют энергию $E_l = El/L$. Следовательно, на этом участке образуется $N = E/E_{ion}$ ионов, где E_{ion} — средняя энергия, которую тратит электрон на образование пары ионов в газе (считаем, что вся энергия электронов расходуется на ионизацию газа, т.е. делаем верхнюю оценку). Получается, что концентрация ионов на этом участке равна $n = N/V = N/lS = E/lSE_{ion}$, где S — площадь поперечного сечения пучка электронов. Примем среднюю энергию, которую тратит электрон на обра-

зование пары ионов, равной 33 эВ [11]. Так как все рассуждения проведены для одного электрона, необходимо умножить полученную концентрацию на число электронов в одном электронном импульсе (считаем, что между импульсами ионы в газе полностью рекомбинируют). Тогда получим концентрации ионов для аргона $n(\text{Ar}) \approx 8.66 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Известно, что показатель преломления плазмы определяется величиной $\gamma = (1 - (\lambda/\lambda_k)^2)^{0.5}$, где $\lambda_k = 3.3 \cdot 10^6 n^{-0.5}$ — длина волны электромагнитного излучения с частотой, равной так называемой «критической частоте» плазмы, λ — длина волны света, для которой нас интересует значения показателя преломления (в нашем случае $\lambda \approx 500 \text{ нм}$) [4]. Для аргона $\lambda_k(\text{Ar}) \approx 0.035 \text{ см}$.

В итоге находим, что для аргона $\gamma \approx 1 - 5 \cdot 10^{-6}$.

Итак, по оценкам, ионизация газа смещает показатель преломления на величину порядка 10^{-6} от его значения. Как можно понять из формулы, значение пороговой энергии смещается на ту же величину, а значит, влияние ионизации на показатель преломления является пренебрежимо малой величиной.

6. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Когда пучок электронов проходит через газ, последний, несомненно, нагревается. Концентрация газа n и его показатель преломления, связаны друг с другом (в первом приближении пропорциональны друг другу). При постоянном давлении из уравнения Клапейрона–Менделеева следует, что $n \sim T^{-1}$. Следовательно, температура может серьезно повлиять на показатель преломления газа, и это необходимо учитывать. Оценка показывает, что при прохождении электронного импульса от 10-МэВного ускорителя НИИЯФ МГУ через аргон, температура последнего может повышаться на 140 К. Однако, кратковременность импульса (несколько микросекунд) не позволит газу, непосредственно находящемуся в пучке электронов, расширяться, а, значит, его концентрация почти не изменится. К моменту прихода следующего импульса (примерно через секунду) газ из канала пучка расширится и полностью перемешается с газом в объеме камеры. Поэтому никакого влияния на показатель преломления газа в момент прохождения импульса такой нагрев не окажет.

Однако выделяющееся при прохождении электронных пучков тепло накапливается внутри камеры датчика энергии и средняя температура газа в камере становится выше температуры окружающей среды. Нагрев газа ведет к увеличению измеряемого давления в камере. Но, поскольку объем и количество газа в камере фиксированы, его концентрация, а, значит, показатель преломления при этом не меняются. По этой причине измерение температуры газа в камере необходимо для коррекции измеряемого давления.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ходе данной работы, было создано работающее устройство для измерения энергии электронов с помощью излучения Вавилова–Черенкова. Основная часть данной установки — камера, наполняемая газом, в котором пучок электронов и создает ИВЧ, показана на рис. 2.

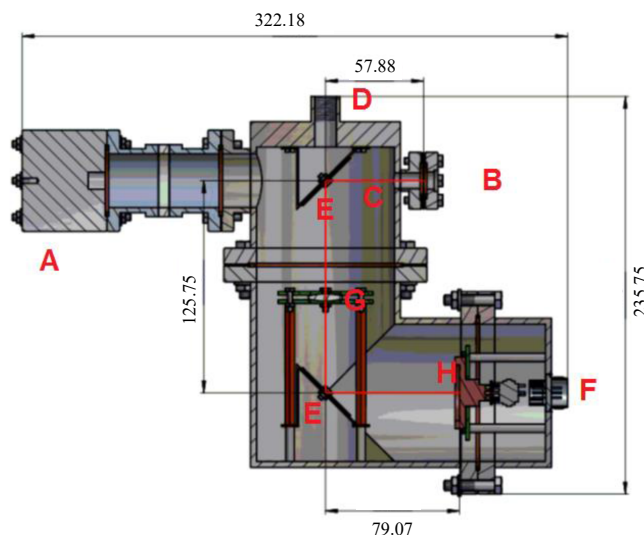


Рис. 2. Схема экспериментальной камеры, в которой генерируется ИВЧ и измеряется его интенсивность.

В состав камеры входят цилиндр Фарадея А, поглощающий пучок электронов после его прохождения через газ и позволяющий контролировать моменты начала и окончания прохождения пучка через газ; входное окно В, через которое пучок попадает в камеру; трубки D для подачи газа в камеру; зеркала E, отражающие ИВЧ и направляющие его на фотодиод; линза G, фокусирующая ИВЧ на фотодиод; фотодиод H и F, регистрирующий ИВЧ. Буквой С обозначен участок пути электронного пучка, на котором генерируется ИВЧ. Путь ИВЧ в камере обозначен красной линией.

Пучок электронов попадает во входное окно. Проходя через газ, заполняющий камеру, электроны генерируют ИВЧ. ИВЧ отражается от первого (верхнего) зеркала, пучок электронов проходит далее и попадает в цилиндр Фарадея, где поглощается. После этого ИВЧ фокусируется собирающей линзой, отражается от второго (нижнего) зеркала и попадает на фотодиод, который преобразует его энергию в электрический импульс.

Важной частью установки является фотодиод, поскольку он регистрирует ИВЧ. В ходе работы был выбран фотодиод типа PIN-25DP [12]. Главное достоинство его — большая площадь поверхности. Площадь его чувствительной зоны равна 613 мм^2 .

Как известно, фотодиоды могут работать в двух различных режимах: фотогальваническом и фотодиодном [13, 14]. В первом режиме работает фотодиод,

не подключенный к внешнему источнику напряжения. При работе в этом режиме фотодиод имеет высокую инерционность. Поскольку вспышки ИВЧ имеют длительность в несколько микросекунд, их измерения следует проводить в фотодиодном режиме работы, имеющем меньшую инерционность.

Рассмотрим подробнее работу фотодиода в фотодиодном режиме [14]. Пусть фотодиод подключен к внешнему источнику напряжения через нагрузочное сопротивление.

В отсутствие освещения фотодиод полностью закрыт, то есть фактически ведет себя как разрыв цепи. Падение напряжения на нем при этом равно внешнему напряжению источника. Если на фотодиод падает некоторое количество света, он начинает пропускать ток, «открываться». Если падающий свет имеет достаточную интенсивность, фотодиод полностью открыт, напряжение на нем равно нулю (он ведет себя как «короткое замыкание»).

При подаче на фотодиод вспышки света начинается быстрое увеличение концентрации носителей заряда, генерируемых светом. В результате, как показывает подробный анализ работы фотодиода [15], зависимость падения напряжения на фотодиоде от времени в момент начала вспышки практически линейная и тангенс угла ее наклона прямо пропорционален интенсивности падающего света. Влияние иных факторов на этот угол наклона мало. По этой причине для измерения интенсивности вспышки ИВЧ необходимо измерять именно этот угол наклона в то время, пока фотодиод продолжает освещаться. Если вспышка света достаточно короткая (фотодиод не успевает достигнуть насыщения до ее конца), то после окончания вспышки падение напряжения на фотодиоде продолжит уменьшаться некоторое время, а потом вновь начнет расти. Фотодиод будет «закрываться». Падение напряжения на фотодиоде при этом экспоненциально зависит от времени (подобно разрядке обычного конденсатора).

Общая зависимость падения напряжения от времени показана на рис. 3.

Здесь участок АВ соответствует линейной зависимости падения напряжения на фотодиоде от времени, ВС — уменьшению падения напряжения «по инерции» после окончания вспышки, CD — «закрытию» фотодиода.

Как уже было сказано выше, для определения интенсивности вспышки света нужно измерять тангенс угла наклона на участке АВ. Однако это является довольно сложной задачей, поэтому в ходе работы было решено для начала измерять вместо угла наклона участка АВ, значение падения напряжения в точке его минимума С, т.е. U_{min} . Безусловно, это сказывается на точности измерений, однако, в первом приближении, угол наклона на участке АВ пропорционален U_{min} , поэтому такой способ измерений не должен вносить значительную погрешность в результаты измерения.

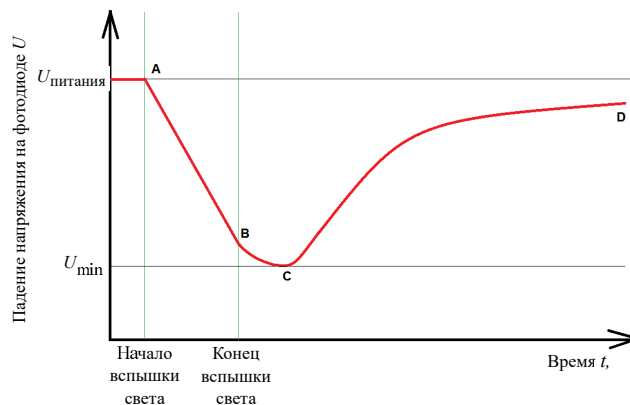


Рис. 3. Примерный ход зависимости падения напряжения на фотодиоде от времени при воздействии на фотодиод достаточно яркой вспышки света.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ

При работе экспериментальной установки обнаружилось, что фотодиод в момент прохождения импульса электронов полностью открывается, причем при давлении около 1 атм., когда ИВЧ по расчетам должно полностью отсутствовать. Следовательно, на фотодиод в этот момент попадает излучение иного происхождения. Например, видимое переходное излучение [16], тормозное излучение [17, 18], фотолюминесценция газа [19].

Для уменьшения влияния излучений этих типов было решено закрыть фотодиод от гамма-квантов, для чего камера с газом и особенно та ее часть, где находится фотодиод, были закрыты слоем свинцовых кирпичей (далее этот слой называется внешней защитой), насколько это было возможно.

Благодаря внешней защите удалось серьезно ослабить потоки радиации, попадающие на фотодиод. Так, если до использования внешней защиты, напряжение на фотодиоде в момент прохождения импульса было равно нулю (т.е. он был полностью открыт), то при наличии этой защиты напряжение в максимуме импульса стало равно около 3.5 В (при давлении около 1 атм.). Напомним, что на полностью закрытом, (т.е. неосвещенном), фотодиоде падение напряжения равно внешнему напряжению, т.е. 10 В.

После создания внешней защиты потоки излучения, падающие на фотодиод, были ослаблены до значений, делающих возможным поиск ИВЧ и порогового давления. Сигнал с фотодиода измерялся осциллографом. Кроме этого сигнала измерялись синхронизирующий сигнал ускорителя и сигнал с цилиндра Фарадея. Их измерение велось с целью отслеживания моментов появления пучка электронов и его исчезновения. Наблюдаемые сигналы в одной из экспериментальных точек видны на фотографии ниже (рис. 4).

Как видно из данного рисунка, сигнал с фотодиода,

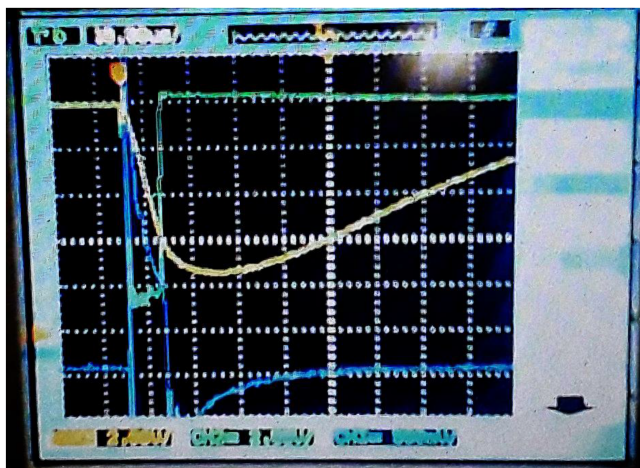


Рис. 4. Изображение с экрана осциллографа в одной из экспериментальных точек. Зеленая линия — сигнал с цилиндра Фарадея, желтая — сигнал с фотодиода, синяя — сигнал синхронизации от ускорителя.

во-первых, весьма сильный (намного превышает помехи) и, во-вторых, начинается в момент появления сигнала с цилиндра Фарадея. Поэтому можно уверенно сказать, что причиной данного сигнала является сгусток электронов, проходящий через газ. Как было указано выше, кроме излучения Вавилова–Черенкова фотодиод может реагировать и на излучения иной природы [16–19]. Однако интенсивность этих видов излучений не должна сильно зависеть от давления газа в камере. И только черенковское излучение имеет ярко выраженный порог (при давлениях меньше порогового оно просто отсутствует), а также линейно зависит от давления газа (как было указано выше).

Поэтому, измерив сигнал с фотодиода при различных давлениях, и построив зависимость $U = U(p)$, где U — сигнал с фотодиода, p — давление газа, можно понять, верно ли предположение, что фотодиод регистрирует именно ИВЧ, и, если это так, определить пороговое давление, а значит и энергию электронов.

В эксперименте эта зависимость была получена для нескольких случаев, отличающихся толщиной свинцовой защиты фотодиода и точкой, на которую был сфокусирован пучок ускорителя. Наиболее информативная зависимость была получена для случая пучка, сфокусированного на бесконечность («параллельный пучок») и толстого слоя защиты (рис. 5).

В прочих случаях были получены почти идентичные результаты, но с меньшим количеством экспериментальных точек, что затрудняет их интерпретацию.

Видно, что при давлении в камере порядка 5 атм., наблюдается резкая смена характера роста графика. Если при давлении, меньшем 5 атм., амплитуда сигнала практически не отличается при разных давлениях, то после 5 атм., наблюдается быстрый линейный рост амплитуды в зависимости от давления. Обработка полученной зависимости по методу наименьших

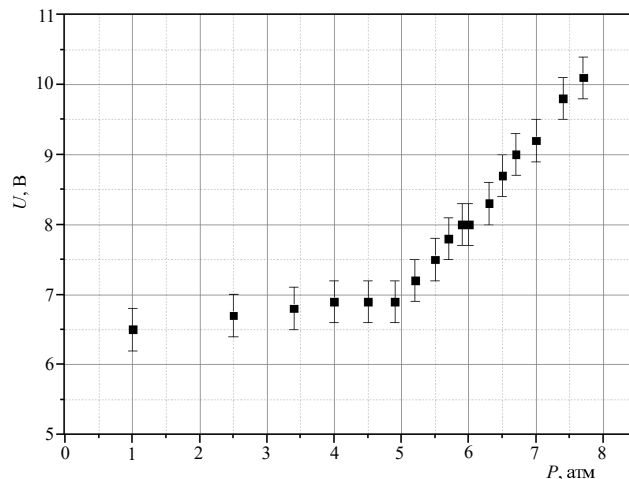


Рис. 5. Зависимость падения напряжения на фотодиоде от давления, полученная в одном из экспериментов.

квадратов дала значение порогового давления $p_n = (5.05 \pm 0.21)$ атм. Соответствующая энергия электронов равна $E = (9.9 \pm 0.3)$ МэВ. Реальная энергия данного ускорителя составляет приблизительно 10 МэВ. Учитывая относительно небольшое количество экспериментальных точек на графике (3–4 точки на атмосферу в области порога) и относительно невысокую точность измерений давления и амплитуды сигнала, это можно считать очень хорошим результатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы создана установка, измеряющая энергию пучка электронов от ускорителя пороговым методом. Главными достоинствами установки являются мобильность, относительная простота, достаточная скорость измерений.

Получены первые экспериментальные значения энергии пучка электронов, показывающие достаточно хорошую точность установки.

[1] Черенков П. А. ДАН СССР. 1934. 2, № 8. Р. 451.

[2] Тамм И. Е., Франк И. М. // ДАН СССР. 1937. 14, № 3. Р. 107.

[3] Болотовский Б. М. // УФН. 1957. 62. <https://ufn.ru/ru/articles/1957/7/a/>

[4] Полиектов В. В. Измерение энергетического спектра

- пучка электронов с помощью излучения Вавилова–Черенкова. Дисс... 2007. Ссылка на автореферат: <http://dbserv.sinp.msu.ru:8080/sinp/files/pp-817.pdf>
- [5] *Bhidey M. R.* et al. // Proc. Phys. Soc. London. 1958. **72(6)**, N 468. P. 973.
- [6] *Trukhanov K. A.* et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2010. **74**, N 11. P. 1600.
- [7] *Trukhanov K. A., Shvedunov V. I.* // Radiation Physics and Chemistry. 2006. **75**, N 8. P. 899.
- [8] *Бабичев А. П.* и др. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [9] *Арцимович Л. А.* Элементарная физика плазмы. Издание третье. М.: Атомиздат, 1969.
- [10] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm02.htm> (Взаимодействие электронов с веществом).
- [11] *Широков Ю. М., Юдин Н. П.* Ядерная физика. М.: Наука, 1972.
- [12] http://www.azimp.ru/catalogue/si_photodiodes/448/
- [13] <https://www.sgu.ru/archive/old.sgu.ru/files/nodes/78139/d-photo.pdf>
- [14] *Харченко В. М.* Основы электроники: Учеб. Пособие для техникумов. М.: Энергоиздат, 1982.
- [15] *Жигарев А. А., Шамаева.* Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. М.: Высш. Школа, 1982.
- [16] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiat/tr.htm>
- [17] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e166.htm>
- [18] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiat/br.htm>
- [19] *Левшин Л. В.* Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М.: Наука, 1951.

Measurement of electron beam energy using Vavilov–Cherenkov radiation

D. A. Bobylev^{1,2,a}, V. V. Hankin^{1,2,b}, V. I. Shvedunov^{1,2,c}

¹*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)
Moscow, 119991, Russia*

²*Laboratory of electron accelerators MSU Ltd (LEA MSU Ltd) // Moscow, 119991, Russia
E-mail: ^aagava2309@yandex.ru, ^bv-k32@yandex.ru, ^cshvedunov@gmail.ru*

The paper presents the results of the development and preliminary tests of a device based on the use of Cherenkov radiation for the operational control of the energy of an accelerated electron beam of an industrial accelerator, which is ejected into the atmosphere, intended for electronic processing of products.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq

Keywords: accelerator, Cherenkov radiation, refractive index.

Received 02 February 2021.

Сведения об авторах

1. Бобылев Дмитрий Алексеевич — студент; тел.: (903) 790-72-79, e-mail: agava2309@yandex.ru.
2. Ханкин Вадим Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; e-mail: v-k32@yandex.ru.
3. Шведунув Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; e-mail: shvedunov@gmail.ru.