

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

А. М. Трохан (Новосибирск)

Измерения напряженности магнитных полей при помощи зондов не всегда возможны. Введение в исследуемую область пространства зонда может исказить изучаемый процесс; кроме того, механическая прочность датчиков, иногда оказывается недостаточной, например при измерениях в плазме или в случае ударных процессов. Ввиду этого большой интерес представляет нахождение средств измерения местной напряженности, а также средств визуализации магнитных полей в газовой среде, не требующих введения в рассматриваемое пространство каких-либо зондов.

Рядом автором [1,2] для визуализации сильных магнитных полей использовался газовый разряд при пониженном давлении. Однако газоразрядные методы обладают рядом существенных недостатков (ограниченность размеров исследуемых полей, узкий диапазон давлений газа, необходимость создания в исследуемой среде дополнительного электрического поля и т. д.) и позволяют осуществить лишь визуализацию без определения величины напряженности поля. Автором для исследования магнитных полей был использован пучок быстрых моноэнергетических электронов, что позволило в значительной мере избежать указанных недостатков.

Пучок электронов при распространении в газе тормозится и рассеивается в результате столкновений с частицами среды. Полная длина пробега пучка электронов [3]

$$R = 4.57 \cdot 10^{-3} \frac{u_0^{1.75}}{\rho} [\text{см}]$$

Здесь u_0 [кэ] — ускоряющее напряжение, ρ [ме/см³] — плотность газа.

Рассеивание пучка увеличивается по мере удаления от точки ввода электронов из вакуума, где они ускоряются, в газ. Если полная длина пробега пучка существенно превышает величину рассматриваемого отрезка (примерно на порядок), рассеивание невелико. Таким образом, достаточно малое рассеивание можно получить, применяя соответственно большие ускоряющие напряжения. В качестве примера можно назвать такие цифры: при ускоряющем напряжении 100 кэ и плотности газа, соответствующей давлению 10 мм рт. ст. при нормальной температуре, полная длина пробега пучка составляет в воздухе 8,5 м, а в водороде 123 м или 1.6 м при нормальном давлении.

В результате торможения средняя энергия электронов меняется по мере удаления от источника. Если рассматриваются отрезки траекторий пучка, соизмеримые с длиной полного пробега в данной среде, это изменение энергии нужно учитывать.

Каждый в отдельности взятый электрон пучка в результате взаимодействия с частицами газа может двигаться по весьма различным траекториям. Однако в результате осевой симметрии вероятностей рассеивания траектория оси пучка, по-видимому, соответствует траектории одиночного электрона соответственно меняющейся энергии, движущегося без соударений с частицами среды. Влияние нарушения моноэнергетичности пучка будет отмечено ниже. Уравнение движения электрона в электрическом и магнитном полях для нерелятивистского случая имеет вид

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{e}{m} \{ \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \} \quad (2)$$

Здесь m — масса электрона, e — заряд электрона, \mathbf{v} — вектор его скорости, \mathbf{E} — напряженность электрического поля, \mathbf{B} — магнитная индукция, t — время.

Пусть электрическое поле отсутствует. Тогда, как известно, траектория электрона будет представлять собой спираль, навивающуюся на магнитные силовые линии. Радиус спирали равен

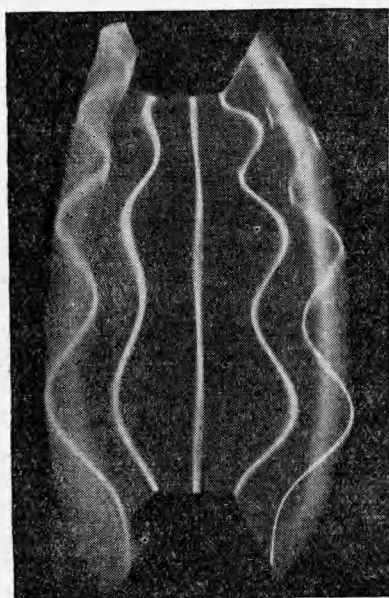
$$r = 33.7 \frac{\sqrt{u}}{B} \sin \alpha [\text{мм}] \quad (3)$$

Здесь u [э] — скорость электрона; B [эс] — магнитная индукция, равная напряженности магнитного поля H [э], так как речь идет об измерениях в воздухе; α — угол между направлением силовых линий поля и скоростью электрона.

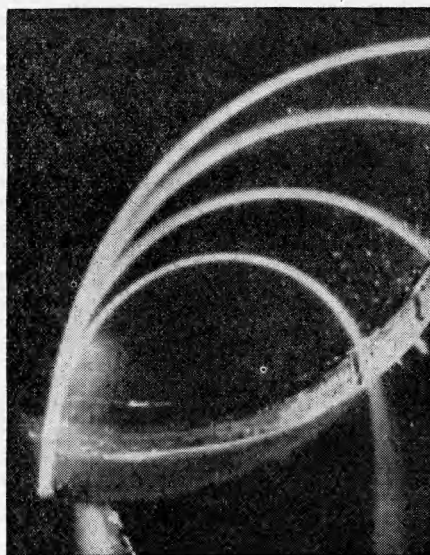
Пусть радиус спирали мал по сравнению с линейными размерами исследуемого магнитного поля. При этом электроны, вводимые в пространство в какой-либо точке, движутся внутри магнитной трубки, проходящей через эту точку. Диаметр трубки тем меньше, чем меньше отношение \sqrt{u}/H . Вводя электроны в различных точках поля можно найти соответствующее семейство магнитных силовых линий, а следовательно, и поле вектора напряженности. Величина энергии электронов при этом безразлична, если только она достаточно мала.

Для регистрации траекторий пучка удобно использовать флюоресценцию газа, вызываемую прохождением электронов. При плотностях воздуха, соответствующих давлению при нормальных условиях выше 10—50 микрон рт. ст., свечение газа легко обнаруживается невооруженным глазом. На фиг. 1 представлена фотография траекторий пучка электронов, обладающих начальной скоростью 500 эв в воздухе при давлении 0.1 мм рт. ст., вводимого в различных точках в поле между полюсами магнита

через прорез в одном из полюсов. Ток пучка около 50 *мкА*. Расстояние между полюсами равно 33 *мм*. Электроны вводятся снизу. В результате того, что начальное направление пучка в различных точках одинаково (вертикальное), начальный угол между пучком и силовыми линиями различен, соответственно различны и радиусы спиралей. Сплошные белые полосы в центрах крайних спиралей образованы вторичными электронами, выбитыми из материала верхнего полюса. Они обладают меньшей энергией и идут сверху вниз.



Фиг. 1



Фиг. 2

Вращение электронов при движении по спирали происходит с циклотронной частотой ω_c , которая зависит только от напряженности поля

$$\omega_c = \frac{e}{m} H \quad (4)$$

Измерив по фотоснимку шаг спирали L и зная скорость движения электронов, можно, таким образом, найти местную напряженность магнитного поля

$$H = 211 \frac{\sqrt{u}}{L} \cos \alpha \text{ [э]} \quad (5)$$

Здесь u [э] — скорость электронов, L [мм] — шаг спирали, α — угол между направлением силовых линий и скоростью электрона.

На фиг. 1 шаг спирали в верхней части промежутка меньше, чем в нижней. Это вызвано изменением скорости электронов за счет торможения газом.

Пространственные осреднения измерений при исследовании данным методом тем меньше, чем меньше скорость электронов. Минимальная скорость электронов в вольтах, необходимая для возможности флуоресцентной визуализации, может быть определена из соотношения

$$u_{\min} = 12340 / \lambda_{\min} \quad (6)$$

Здесь λ_{\min} — минимальная длина волны излучения в ангстремах, возбуждаемого электронными ударами в данной среде.

Обращаясь к формуле (3), можно заключить, что данным методом можно исследовать магнитные поля напряженностью от нескольких десятков эрстед до сколь угодно больших величин.

Рассмотрим второй пример. Пучок электронов, обладающих достаточно высокой энергией, направляется перпендикулярно к магнитным силовым линиям при отсутствии электрических полей. Определив фотографическим способом местный радиус кривизны траектории пучка в интересующей нас области и найдя энергию электронов, соответствующую этому участку траектории, можно из формулы (3) найти местную напряженность магнитного поля. На фиг. 2 приведена фотография пучков электронов, имеющих ускоряющие напряжения, равные 5, 10, 20 и 30 *кВ*, проходящих вблизи постоянного магнита диаметром 35.8 *мм* в воздухе при давлении 0.1 *мм* рт.ст. Начальный диаметр пучка 1 *мм*. На фиг. 3 приведена фотография пучков электронов тех же энер-

гий при давлении 10 мм рт.ст. Как видно из фиг. 3, увеличение плотности газа накладывает определенные ограничения на минимальное ускоряющее напряжение пучка.

Торможение электронов пучка средой приводит к нарушению его моноэнергетичности. Электроны меньших энергий закручиваются полем сильнее, поэтому происходит нарушение симметрии пучка относительно оси. На фиг. 4 приведена типичная микрофотограмма поперечного сечения светимости пучка при его распространении поперек магнитного поля. Видно уменьшение крутизны кривой справа за счет электронов меньших энергий. Сдвиг положения максимума кривой однако мал, если ускоряющее напряжение не слишком мало для данной плотности среды.



Фиг. 3

Изменение энергии электронов вдоль траектории пучка может быть определено как расчетным путем, так и путем предварительных тарировок по изменению радиуса кривизны пучка вдоль траектории при распространении в однородном поле при заданной величине плотности среды.

Измерение местного радиуса кривизны пучка удобно производить микрофотометрированием по прогибу на заданных хордах. Пространственные осреднения, неизбежные при измерении, зависят от радиуса кривизны пучка и его ширины. Диаметр пучка, если плотность среды невелика, может быть весьма мал. Так, например, в работе [4] получены пучки электронов диаметром 10^{-5} мм при ускоряющем напряжении 100 кВ и диаметром 10^{-4} мм при ускоряющем напряжении 40 кВ.

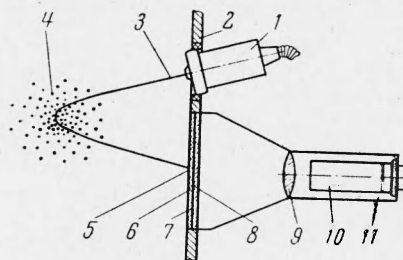
Наряду с отсутствием необходимости введения в исследуемую среду посторонних тел вторым основным достоинством электронного пучка как магнитометрического зонда является его исключительно малая инерционность. Действительно, время, за

которое электроны при ускоряющем напряжении в несколько десятков киловольт проходят расстояние, например, 1 м, имеет порядок 10^{-8} сек. Такой же порядок величины имеет и время высвечивания газов, возбуждаемых быстрыми электронами [5]. Интенсивность свечения газов при облучении пучком электронов достаточна для его

скоростной регистрации при помощи электронно-оптических преобразователей с усилением света, разрешающее время которых при покадровой съемке достигает 10^{-8} — 10^{-9} сек. Аналогичное временное разрешение может быть получено путем непрерывной регистрации свечения вызываемого импульсно-модулированным электронным пучком.



Фиг. 4



Фиг. 5

При измерениях в горячих газах или при наличии каких-либо посторонних источников света регистрация флюоресценции газа затруднена. Однако в этих случаях может быть использована регистрация полного отклонения пучка полем. Пример измерительного устройства такого типа приведен на фиг. 5. Электронная пушка 1, укрепленная при помощи вакуумного шарнира в стенке 2, испускает узкий пучок электронов 3, отклоняемый исследуемым магнитным полем 4. Пройдя исследуемое пространство, пучок попадает на тонкую фольгу 5, вызывая свечение в слое люминофора 6, распо-

ложенного под ней. Свет, излучаемый люминофором, пройдя сквозь кодовую диафрагму 7 и стекло 8, через объектив 9 попадает на катод фотоумножителя 10, расположенного в кожухе 11. При изменении напряженности магнитного поля положение светящегося пятна, соответствующего входу пучка, меняется, перемещаясь по кодовой диафрагме. Кодовая диафрагма представляет собой серию продольных щелей, расположенных в определенной легко расшифровываемой последовательности. При попадании на щели диафрагмы светящееся пятно вызывает появление импульсов в фотоумножителе, которые развертываются осциллографом. Знание точек входа и выхода



Фиг. 6



Фиг. 7

пучка заданной энергии из исследуемого пространства не дает однозначного определения напряженности поля, если геометрия поля неизвестна. Однако, меняя от опыта к опыту ускоряющее напряжение пучка, или используя одновременно несколько пучков разных энергий, можно получить весьма полную информацию о структуре и величине напряженности исследуемых полей как стационарных, так и быстро меняющихся. Разрешающее время при измерениях данным методом определяется главным образом временем высвечивания используемого люминофора и может достигать величины порядка 10^{-8} сек.

В случае, когда максимальный ход луча невелик, в качестве детектора удобно использовать непосредственно фотоумножитель с большим катодом, покрываемым люминофором и кодовой диафрагмой. Если исследуются длительные процессы, более удобно производить регистрацию на кинолентку, движущуюся перпендикулярно к плоскости чертежа.

Для измерения электрических полей пучки электронов в настоящее время используются довольно широко [6,7]. При этом либо компенсируется, либо измеряется полное отклонение пучка, что позволяет найти среднюю напряженность поля. Использование флюоресценции для визуализации траектории пучка в ряде случаев может существенно уменьшить величину пространственных осреднений.

На фиг. 6 приведена фотография пучка электронов энергией 3 кэв, проходящего через поле между двумя пластинами при наличии тлеющего разряда. Давление воздуха при этом было равно 0.1 мм рт. ст. Картина процесса в данном случае та же, что и при отклонении луча в осциллографических трубках за исключением эффектов, вносимых воздухом (рассеивание пучка; свечение разряда; свечение, вызываемое пеленой положительных ионов, идущих к отрицательно заряженной пластине и т. д.).

Флюоресцентная визуализация распространения электронных пучков может быть использована для исследования и более сложных полей, чем в приведенных выше примерах, однако соответственно сложнее становится и интерпретация получаемых результатов. При этом использование электронных пучков становится целесообразным

скорее для исследования движения электронов в задаваемых полях, чем для исследования самих полей. Однако даже и в этих случаях использование пучков может дать определенную информацию о структуре полей. В качестве последней иллюстрации на фиг. 7 приведено отражение пучка 8 кэв электронов от магнитного экрана.

В заключение необходимо отметить, что для исследования полей приведенными выше методами необходимо использование достаточно интенсивных моноэнергетических пучков электронов. Для ввода таких пучков из вакуума в газ, как правило, нельзя использовать фольговые окна из-за ограничения плотности тока и сильного нарушения моноэнергетичности, особенно при малых ускоряющих напряжениях. Для этой цели наиболее пригодны различного рода газодинамические окна. В данной работе использовалась электронная пушка конструкции ВЭИ с дифференциальным газодинамическим окном С. Т. Синицына.

Поступила 3 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaup F., Schedling J. A. Improvements in visual depiction of Magnetic lines of force by means of a gas discharge, J. Appl. Phys., 1951, 22, 1, 11—13.
2. Арденне М. Применение газоразрядной трубки с точечным катодом для визуального определения формы силовых линий сильного магнитного поля. ЖЭТФ, 1953, т. 25, № 6, стр. 749—750.
3. Grün A. E. Lumineszenz-photometrische Messungen der Energieabsorption im Strahlungsfeld von Elektronenquellen Eindimensionaler Fall in Luft, Zeitschrift für Naturforschung, 1957, 12a, 2, 89—95.
4. Davoine F. Etude d'une sonde électronique fine Applications, J. Phys. et Radium, 1954, 15, 12, 90—91.
5. Schmidt K. Abklingung und Mechanismus der Lumineszenz, von Gasen bei Anregung durch schnelle Elektronen, Zeitschrift für Naturforschung, 1956, 11a, 12, 1023—1030.
6. Warren R. W. Measurement of electric fields as applied to glow discharges, Rev. Scient. Instrum., 1955, 26, 8, 765—770.
7. Солнцев Г. С., Порохин А. Г., Чистякова Н. М. Измерение электрических полей в высокочастотном разряде низкого давления при помощи электронного пучка. Изв. АН СССР, серия физ., 1959, т. 23, № 8, стр. 1026—1030.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ДАТЧИКАМИ ДАВЛЕНИЙ

М. Е. Топчиян (Новосибирск)

Явление спиновой детонации исследовалось до последнего времени в основном оптическими методами [1—5]. Постановка эксперимента в этих работах дает возможность исследовать структуру скачков. В работах [6—9] для исследования спина применялся метод следовых отпечатков на закопченных стенках детонационной трубки. Для выяснения формы переднего фронта был применен метод соударения спиновой детонационной волны со встречным ударным фронтом. Эти опыты подтвердили существование излома переднего фронта, обнаруженное ранее в работах [1,2] и предполагавшееся в работах [10,11].

В настоящее время существуют две основные гипотезы о системе скачков в области наиболее яркого свечения. Первая, выдвинутая в работах [10,11], основана на предположении, что область наиболее интенсивного свечения находится в изломе переднего фронта; вторая, предложенная в работах [1,2,3,12], предполагает, что эта область находится позади переднего фронта и является самостоятельной детонационной волной, распространяющейся по газу, предварительно подогретому сжатием в передней волне.

Расчеты, произведенные авторами этих двух гипотез, показывают существенную разницу в величинах максимальных давлений, которые могут развиваться при спине. Для первой гипотезы эта величина ни при каких условиях не может превышать 60 атм при начальном давлении смеси 1 атм, по второй теории давления могут достигать величины порядка 170—180 атм.

Исследования, проведенные в работах [1—5], уже показали правильность второй гипотезы, так как полученная в эксперименте структура скачков хорошо совпадает с предсказанной теорией. Однако представляют интерес непосредственное измерение величин давлений, развивающихся при спине, так как эти эксперименты могут дать дополнительные сведения в пользу одной из двух гипотез. Кроме того, такие измерения могли бы дать сведения о характере изменения давлений и в области за скачками, где обнаруживается шлейф. Возможности таких измерений открываются в связи с созданием малоинерционных высокочувствительных датчиков давления из пьезокерамики титаната бария. Основные исследования работы таких датчиков и разработка их устройства были проведены в работе [13].