

Г. В. СПИВАК и Р. А. ЛУКАЦКАЯ

О ВТОРОМ ПРЕДЕЛЬНОМ СЛУЧАЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 19 II 1948)

Обычно электронно-оптические закономерности наблюдаются при движении в вакууме заряженных частиц в аксиально-симметричных электрическом и магнитном полях. Распространено мнение, что при наличии газа при высоком давлении движение заряженных частиц не будет подчиняться электронно-оптическим закономерностям. В качестве причины указывается на то, что при большом давлении происходит значительное рассеивание заряженных частиц при соударениях с молекулами газа. Это мнение может основываться на экспериментах по изучению „газовой фокусировки“ в электронно-лучевых трубках. Как указывает Арденне⁽¹⁾, при давлениях газа (неона, аргона, водорода и др.), превышающих сотые доли миллиметра ртутного столба, электронный пучок уже начинает рассеиваться, а при более высоком давлении совсем исчезает. Поэтому на первый взгляд кажется безнадежной попытка получения качественных изображений при столь большом давлении, как атмосферное. Однако, как будет показано ниже, это не так. При движении зарядов в воздухе, при атмосферном давлении, вновь создаются такие условия, когда рассеивание при соударениях с молекулами воздуха минимально, и становится возможным перенос качественного изображения на большое расстояние, порядка 10—15 см.

Существенное отличие от первого предельного случая электронной оптики состоит в характере движения заряженных частиц. В первом предельном случае траектория не определяется только местными значениями электрического и магнитного поля, а в силу инерции движения электрона зависит также от распределения скалярного и векторного потенциала на всем пути. Во втором предельном случае, при наличии большого количества соударений, движение характеризуется направлением и величиной силы, действующей в данном месте: E/p и H/p , где p — давление газа.

Целью настоящей заметки является прежде всего: 1) показ экспериментального факта получения при определенных условиях качественных изображений при атмосферном давлении, 2) интерпретация механизма, сводящего на-нет рассеивание заряженных частиц и обеспечивающего их движение согласно действию внешней силы в данном месте.

В предшествующих работах нашей лаборатории были описаны эксперименты по получению изображений как в режиме искрового разряда, так и при помощи импульсной короны⁽²⁾. Эти изображения были искажены фигурами Лихтенберга, скользящими искрами, и на

расстоянии более 0,5 см от объекта до изображения становились уже нечеткими. Нами были проведены эксперименты в режиме кистевого разряда, а также при несамостоятельном разряде, при облучении металлического объекта ультрафиолетом. Опыты, которые будут описаны ниже, подтвердили возможность переноса изображения на расстояние 10—15 см при помощи облучения катода угольной дугой или ртутной кварцевой лампой. Нам удалось также избавиться от сопутствующих изображению и искажавших его фигур Лихтенберга, скользящих искр и других помех.

Описание экспериментов, относящихся к самостоятельному разряду, и подробное описание опытов в режиме несамостоятельного разряда дается нами в другом месте ⁽³⁾. Как известно, первоначальные наблюдения фотоэлектрического эффекта велись при атмосферном давлении. А. Г. Столетов ⁽⁴⁾ в своих классических „Актиноэлектрических исследованиях“ наблюдал фотоэлектрические токи при расстоянии между электродами до 10 см.

При получении увеличенных теневых изображений металлической сетки при помощи кистевого разряда с острия у нас возник вопрос о том, какую роль играет световое излучение острия. Для доказательства того, что изображение может быть создано одними лишь зарядами, мы перешли к несамостоятельному разряду с поверхности пластинки за счет внешнего фотоэффекта.

Обычно нами использовалась цинковая пластинка, которая перед опытом шлифовалась. Ее размеры были порядка 3×3 см. Параллельно ей на различных расстояниях располагалась эбонитовая пластинка, на обороте которой была станиолевая обкладка. Размеры эбонитовой пластинки были различными, но чаще всего порядка 15×15 см. Благодаря различным размерам электродов и в зависимости от расстояния между ними создавалось однородное или неоднородное электрическое поле. В первом случае изображения получались в масштабе 1:1, а во втором случае увеличенные (до 10 раз). Цинковая пластинка помещалась на расстоянии 15 см от источника ультрафиолета. Она присоединялась к отрицательному полюсу источника высокого напряжения (высоковольтная рентгеновская установка), а станиолевая обкладка — к земле, либо к положительному полюсу источника напряжения. При наложении определенной разности потенциалов можно было наблюдать изображение на поверхности эбонитовой пластинки. Если цинковая пластинка не освещалась, либо полярность электродов была обратной, переноса изображения не наблюдалось. „Проявление“ изображения производилось при помощи посыпания эбонитовой пластинки порошком сурика, серы или, чаще всего, талька. Тальк удерживался в тех местах, куда не попадали отрицательные заряды. Для снятия зарядов и „смытия“ изображения достаточно приблизить эбонитовую пластинку к пламени газовой горелки. Мы заметили, что фотоэффектом отображаются не только фигуры от диэлектрика, нанесенные на поверхность металла, но и поверхностные неоднородности само о металла. Это — существенно новый факт, не отмеченный ни А. Г. Столетовым ⁽⁴⁾, ни А. Риги ⁽⁵⁾.

На рис. 1 представлена обычная фотография цинковой пластинки с нанесенной на ней при помощи лака правильной сеткой, при этом вокруг сетки проведены горизонтальные царапины. На рис. 2 показано отображение этой картины несамостоятельным разрядом на эбонитовой пластинке, проявленное при помощи талька. Расстояние d между пластинками (цинковой и эбонитовой) было 6 см и напряжение $V = 11$ kV. Что появление царапин на отображении не случайно, а в данном случае отображается тонкая структура поверхности, легко видеть из рис. 3, на котором показано полученное при помощи фотоэффекта при атмосферном давлении отображение правильной сетки,

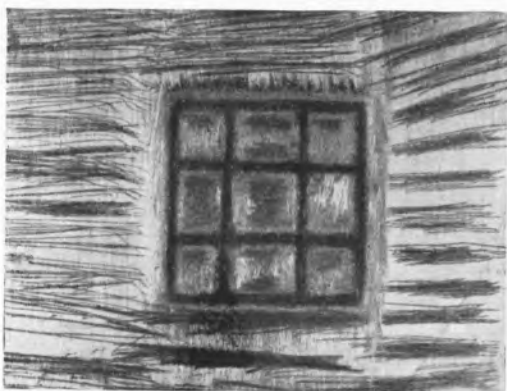


Рис. 1

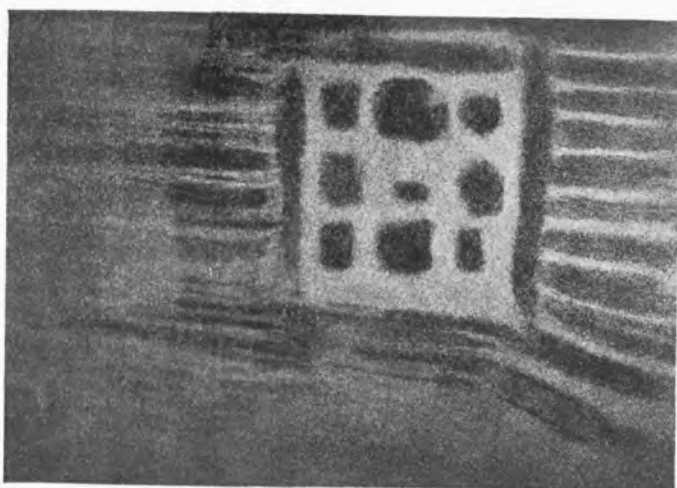


Рис. 2

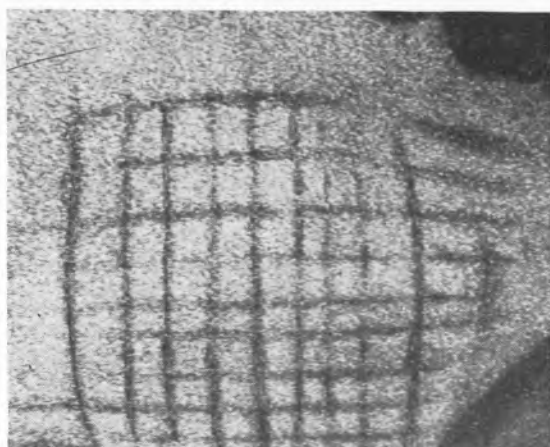


Рис. 3

которая не нанесена, а процарапана на цинке $d=7$ см при $V=11$ kV. Изображение получено при 5-кратном „электронно-оптическом“ увеличении.

Мы заметили также, что отображаются и менее заметные неоднородности на металле. Мы отметили и то, что распределение светлых и темных мест на изображении характеризует качество шлифовки поверхности. Отображение этой сетки вызвано прежде всего тем, что свежeproцарапанные места испускают больше электронов, чем незатронутая поверхность металла. При фиксированном расстоянии между пластинками с ростом значения E/p можно наблюдать появление искажения. При этом мы переходим к другой форме разряда или изменяем кинетику частиц, переносящих изображение. Интересно и то, что перенос вещества в разряде при атмосферном давлении следует определенным правильным путям, подтверждая, с другой стороны, наличие электронно-оптических эффектов при высоких давлениях, как это было показано Лазаренко (6).

Толкование природы электронно-оптических эффектов при иных формах разряда (искра, импульсная корона, кистевой разряд) дано в другой нашей работе (3). Для того чтобы частица, вышедшая из фотокатода, двигалась вдоль силовой линии поля, необходимо, чтобы частица отдавала значительную долю энергии при каждом соударении и вновь набирала скорость на свободном пробеге. Такой частицей может быть только тяжелая частица, а не свободный электрон, выходящий из катода. Роль воздуха, через который проходят электроны, заключается в том, что электроны в значительной мере трансформируются в отрицательные ионы сразу же по выходе из катода. При соударениях медленных отрицательных ионов с молекулами воздуха ионы фактически останавливаются и вновь затем начинают свое движение вдоль поля. Возбуждение газа и ионизирующая способность медленных ионов не могут идти в сравнение с теми же эффектами, вызываемыми электронами. Эти эффекты, однако, существенны при получении изображений в другом режиме разряда (3). Значение силы, действующей на свободном пробеге и определяемой E/p , должно быть таково, чтобы тепловое движение не превалировало над направленным дрейфом ионов. Соблюдение этих условий и объясняет, почему отрицательные ионы могут перенести состояние катода до анода, несмотря на соударения. Возможно, что в механизме переноса изображения играют роль и явления перезарядки, при которых вновь возникающий ион опять следует силовым линиям поля. Количество фотоэлектронов, выходящих из данного места катода, определяет количество отрицательных ионов, доходящих до эбонитовой пластинки. Процарапанные и гладкие места цинковой пластинки испускают разное количество фотоэлектронов, что и дает в конечном итоге изображение сетки.

Следует отметить, что при отображении при помощи электронной оптики в вакууме, в связи с необходимостью уменьшить aberrации, приходится пользоваться параксиальным пучком. При этом величина раствора пучка сказывается на разрешающей способности оптической системы. В нашем же случае, если электроны, выходящие из катода, трансформируются в ионы независимо от угла выхода, может быть использована вся эмиссия из данной точки объекта. Разрешение в нашем случае будет определяться шириной канала, имеющего осью силовую линию. В свою очередь ширина канала определяется отношением скоростей иона: тепловой к направленной.

Расхождение между нашими наблюдениями и явлениями, наблюдаемыми в газонаполненных электронно-лучевых трубках (1), легко разъясняется следующим образом. В газонаполненных трубках (давление $10^{-2} - 10^{-3}$ мм ртутного столба) ток переносится быстрыми электро-

нами, из коих небольшая часть производит ионизацию и создает вдоль луча положительный пространственный заряд, фокусирующий луч. С возрастанием давления электронный луч создает уже плазму, где луч быстро рассеивается. В нашем же случае ионизации при соударениях не происходит, плазма не возникает, заряды переносятся не легкими электронами, а медленными тяжелыми ионами, практически нацело теряющими энергию при соударениях, что и обеспечивает их движение по силовым линиям. Таким образом, большое число соударений, имеющее место при атмосферном давлении, для тяжелых частиц при определенных E/p и H/p является благоприятным фактором, обеспечивающим их движение вдоль направления действующей силы, в отличие от режима, имеющего место в газонаполненной электронно-лучевой трубке.

Получение качественных изображений при движении зарядов вдоль линий поля соответствует второму предельному случаю электронной оптики.

Мы признательны акад. А. А. Лебедеву за внимание и советы при выполнении данной работы.

Физический факультет
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
17 II 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ М. Арденне, Электронно-лучевые трубки, М., 1936. ² G. Spiwak and J. Kardash, J. of Phys., 9, 447 (1945); 10, 252 (1946). ³ Г. В. Спивак и Р. А. Лукацкая, Вестн. Моск. ун-та, в. 4 (1948). ⁴ А. Г. Столетов, Собр. соч., 1, 1939, стр. 217, 267, 270. ⁵ A. Righi, Die Bewegung der Ionen bei der elektrischen Entladung, Лpz., 1907. ⁶ Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, Физика искрового способа обработки металлов, М., 1946.