

Ю. В. БОНДАРЕНКО, В. И. БУДАРНЫХ, В. П. ИЛЬИН,
А. М. ИСКОЛЬДСКИЙ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,
Г. С. ПОПОВА, А. Ф. ШЕСТАК
(Новосибирск)

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В РЕЖИМЕ ФОРСИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ЗАГРУЗОК

Введение. Одним из современных методов исследования быстропротекающих процессов является метод электронно-оптической фоторегистрации. Минимальная длительность экспозиции электронно-оптических систем в кадровом режиме лежит в области единиц наносекунд, а в хронографическом режиме оказывается возможным измерять временные интервалы между импульсами, отстоящими друг от друга на 10^{-10} — 10^{-11} с. Это обстоятельство делает электронно-оптические фоторегистраторы перспективным исследовательским инструментом. Ощутимый эффект от их применения можно ожидать при исследовании динамики лазерного излучения, особенно в экспериментах с квантовыми генераторами на твердом теле.

При регистрации процессов длительностью 10^{-9} — 10^{-11} с с фотокатода электронно-оптического преобразователя (ЭОП) приходится снимать фототок значительной плотности («форсированный режим»). Обычно это обусловлено необходимостью иметь заданную плотность почернения фотоматериала. В форсированных режимах возникают существенные искажения изображения, поэтому кажется естественным переход к системам с большим коэффициентом усиления при одновременном снижении плотности входного фототока [1]. Однако, как показывает анализ вопроса о флюктуациях контраста изображения [2], даже в «идеальных» системах, фиксирующих каждый входной фотоэлектрон, при регистрации сверхбыстрых процессов нельзя избежать отбора большой плотности фототока, если потребовать, чтобы случайная ошибка в определении контраста была мала. Это ограничение не связано со свойствами конкретного фоторегистратора, а носит принципиальный характер. Поэтому рассмотрим более внимательно основные эффекты, ухудшающие качество изображения при больших плотностях фототока.

Качество изображения в ЭОП с электростатической фокусировкой существенно зависит от распределения электрического поля вблизи фотокатода. В форсированных режимах это поле искажается из-за возникновения градиента потенциала на фотокатоде (при плохой его проводимости) и присутствия пространственного заряда. Данная работа посвящена в основном рассмотрению влияния этих двух факторов.

Предварительное рассмотрение. Естественно попытаться найти режимы работы ЭОП, в которых влияние градиента потенциала на фотокатоде и пространственного заряда на качество изображения разграничено. С этой целью был поставлен эксперимент (рис. 1). Тест-объект, спроецированный на фотокаод ЭОП, освещался импульсной лампой. Вблизи максимума вспышки, когда изменение интенсивности света во времени было достаточно малым, на анод ЭОП подавался прямоугольный импульс регулируемой длительности и амплитуды. Фотографировалось изображение тест-объекта, возникающее на экране ЭОП, одновременно контролировались амплитуда и форма импульса фототока.

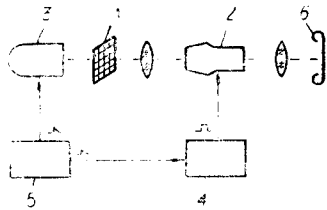


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 — тест-объект; 2 — электронно-оптический преобразователь типа ЗИМ; 3 — импульсный источник света; 4 — импульсный генератор анодного напряжения; 5 — синхрогенератор; 6 — фотоприставка.

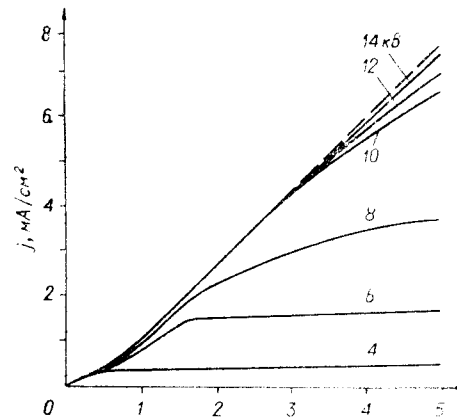


Рис. 2. Люкс-амперные характеристики (по оси абсцисс отложена величина светового потока в относительных единицах).

На рис. 2 приведена зависимость плотности фототока от величины световой загрузки фотокаатода при различных значениях анодного напряжения (длительность анодного импульса составляла 20 мкс, величина световой загрузки изменялась с помощью нейтральных светофильтров). Отклонение люкс-амперных характеристик от линейных и наличие тока насыщения свидетельствуют о присутствии пространственного заряда. Это особенно хорошо видно из кривой рис. 2, соответствующей напряжению 6 кВ. Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что при напряжениях $U_a > 10$ кВ и плотностях токов $j < 1$ мА/см² влиянием пространственного заряда можно пренебречь. Искажения изображения в этом режиме можно связать с влиянием большего поверхностного сопротивления фотокаатода.

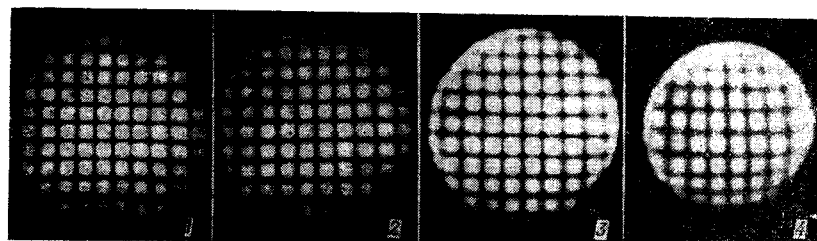


Рис. 3. Искажения, связанные с конечным поверхностным сопротивлением фотокаатода:
1 — $j = 0,025$ мА/см²; 2 — 0,2 мА/см²; 3 — 0,35 мА/см²; 4 — 0,6 мА/см².

Влияние поверхностного сопротивления фотокатода на качество изображения. Рассмотрим снимки, полученные с помощью ЭОП, многощелевой фотокатод которого имеет удельное поверхностное сопротивление $g_0 \sim 10^5$ Ом/квadrat (рис. 3). Возникающие в этом случае искажения изображения (дополнительное увеличение в центре, появление бочкообразной дисторсии, падение разрешения) обусловлены искажением основного фокусирующего поля в прикатодной области за счет потенциального рельефа, формируемого фототоком на поверхностном сопротивлении фотокатода.

Для получения численной оценки этого эффекта был проведен аналитический расчет [3]. Ниже сформулированы основные исходные положения и результаты этого расчета.

Распределение потенциала в зависимости от радиуса ρ по равномерно освещенному фотокатоду, с которого снимается ток плотности j , имеет вид:

$$U(\rho, 0) = \begin{cases} 0; & R_2 \geq \rho \geq R_1; \\ -j g_0 R^2 / 2 \ln \rho / R_1; & R_1 \geq \rho \geq R; \\ \frac{j g_0}{2} \left(\frac{R^2 - \rho^2}{2} - R^2 \ln R / R_1 \right); & R \geq \rho \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R_2 — внешний радиус; R_1 и R — соответственно радиусы активной и загруженной частей фотокатода.

Решая уравнение Лапласа с заданными граничными условиями, находим пространственное распределение потенциала $U(\rho, \xi)$, вызванное распределением потенциала по фотокатоду. $U(\rho, \xi)$ рассматриваем как возмущение по отношению к основному фокусирующему полю.

Как известно, малые искажения изображения можно учесть, если представить зависимость между радиусом вылета электрона ρ и радиусом r , на котором он оказывается на экране, в виде разложения по степеням ρ :

$$r = \rho + A_1 \rho^2 + A_2 \rho^3 + v_0 (A_3 \rho^2 + C) + \dots,$$

где A_1 характеризует дополнительное увеличение, A_2 — дисторсию, A_3 — меридиональную кривизну изображения; v_0 — скорость вылета электрона; величина C связана с падением разрешения, вызванным смещением гауссовой плоскости.

Используя метод возмущений, находим дополнительное смещение электронов, обусловленное полем $U(\rho, \xi)$. Для коэффициентов A_1 и A_2 :

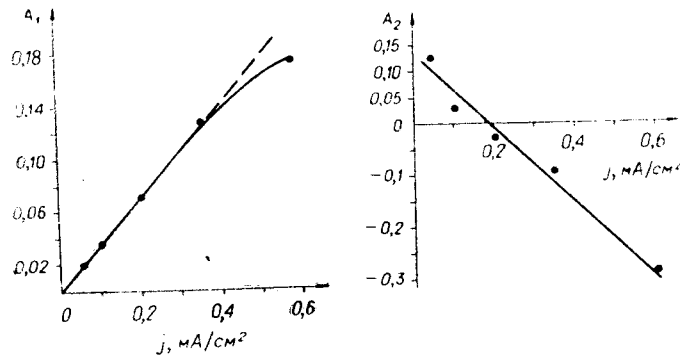


Рис. 4. Зависимость коэффициентов увеличения и дисторсии от плотности тока.

получаем соответственно:

$$A_1 \approx \frac{j g_0}{E_0} G_1 > 0; \quad A_2 \approx \frac{j g_0}{E_0} G_2 < 0, \quad (2)$$

где G_1 и G_2 — константы, зависящие от геометрии и соотношения между активной и загруженной частями фотокатода. Существенно, что коэффициенты A_1 , A_2 , A_3 и C линейно зависят от высоты потенциального рельефа, образующегося на фотокатоде. Линейный характер зависимости коэффициентов A_1 и A_2 подтверждается представленными на рис. 4 графиками, полученными при обработке снимков, показанных на рис. 3.

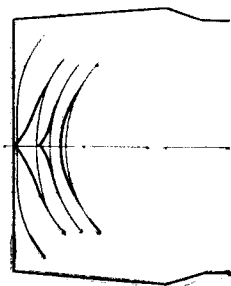


Рис. 5. Эквипотенциали вблизи фотокатода в случае невозмущенного (тонкие линии) и возмущенного полей.

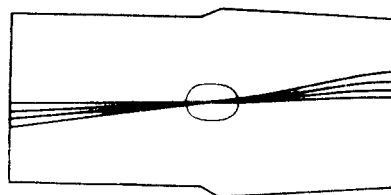
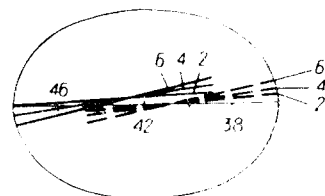


Рис. 6. Пример траекторий электронов, рассчитанных на ЭВМ.



Кроме аналитического расчета, был проведен расчет пространственного распределения поля и траекторий электронов на ЭВМ [4] с учетом распределения потенциала по фотокатоду, задаваемого формулой (1). На рис. 5 представлены эквипотенциали вблизи фотокатода в случае невозмущенного и возмущенного полей. На рис. 6 приведены траектории для одного из значений потенциала на фотокатоде. В правой части этого рисунка в увеличенном виде показана область пересечения траекторий электронов с осью. Сплошные линии — траектории в невозмущенном поле, штриховые — в возмущенном. Здесь явно видно, что область пересечения траекторий с осью смещается к фотокатоду. Дальнейшее увеличение высоты потенциального рельефа приводит к полному разрушению

Рис. 7. Траектории электронов при $U_a = 10$ кВ,
 $U(\rho, 0)_{\max} = 160$ В.



изображения (рис. 7). На экран попадают только центральные и периферийные электроны. Промежуточные траектории заканчиваются на анодной диафрагме. На экране должно появиться яркое пятно в центре и светлое кольцо на краю рабочего поля. Такую картину можно наблюдать на экранах приборов с большим поверхностным сопротивлением фотокатода ($g_0 \gg 10^5$ Ом/квадрат) при больших плотностях тока (так называемое «свертывание» изображения).

Анализ полученных машинным моделированием траекторий электронов показывает, что из-за наличия на фотокатоде потенциального рельефа появляется дополнительное увеличение и бочкообразная дисторсия. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и приведенным выше аналитическим расчетом.

Совокупность результатов эксперимента, аналитического расчета и машинного моделирования дает возможность найти критерий, при выполнении которого можно пренебречь влиянием потенциального рельефа на качество изображения. В применении к исследуемой конструкции, являющейся типичной для большинства однокаскадных ЭОП с иммерсионными линзами, этот критерий можно записать в виде

$$U(\rho, 0)_{\max}/U_a \leq 5 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

где $U(\rho, 0)_{\max}$ — максимальная высота потенциального рельефа на фотокатоде. Согласно (1),

$$U(\rho, 0)_{\max} = \frac{j g_0 R^2}{4} (1 - 2 \ln R/R_1).$$

В случае равномерной загрузки всего фотокатода $U(\rho, 0)_{\max} = j g_0 R^2/4$. В более общем виде (3) переходит в

$$\frac{j g_0 R}{E_0} \leq 5 \cdot 10^{-2}, \quad (3')$$

где E_0 — напряженность основного фокусирующего поля на фотокатоде.

Знание начальных коэффициентов увеличения и дисторсии A_1^0 и A_2^0 , присущих данной системе, а также A_1 и A_2 , обусловленных потенциальным рельефом, позволяет при обработке экспериментальных снимков учесть геометрические искажения, если они не очень велики.

Влияние пространственного заряда на качество изображения. Естественно попытаться уйти от влияния поверхностного сопротивления фотокатода, сделав это сопротивление малым. С этой целью были изготовлены опытные образцы ЭОП, которые отличались от использовавшихся в предыдущих экспериментах только малой величиной g_0 (интегральная чувствительность фотокатода составляла 30 мкА/лм). Один из таких преобразователей, имеющий $g_0 \approx 6$ Ом/квадрат, исследовался в схеме, аналогичной приведенной на рис. 1, при длительностях импульса анодного напряжения 3—5 нс. Условие (3) выполнялось во всем диапазоне j (1—40 мА/см²) и U_a (16—60 кВ). На рис. 8 приведены фотографии тест-объекта, полученные с помощью этого ЭОП при различных значениях световой загрузки фотокатода. Характер искажений при этом совершенно другой, чем это показано на рис. 3: появляется подушкообразная дисторсия, изображение стягивается к центру. Повышая U_a до 60 кВ, можно существенно снизить искажения (рис. 9).

Рассмотрим снимки, представленные на рис. 10. Они получены при исследовании в этих же условиях одного из ЭОП с $g_0 \sim 10^4$ Ом/квадрат. В этом случае следует ожидать совместного влияния пространственного заряда и потенциального рельефа на фотокатоде. Повышением анодного напряжения можно уменьшить влияние пространственного заряда, но при этом все же остается характерная для действия потенциального рельефа бочкообразная дисторсия.

Если рассматривать ЭОП как эмиссионную систему, подчиняющуюся «закону 3/2», можно дать грубую оценку величины предельной плотности фототока:

$$j_n = k U_a^{3/2}, \quad (4)$$

где коэффициент k зависит от геометрии системы. Определим порядок величины k для исследуемой конструкции. На основании данных рис. 2 получаем $k \sim 10^{-8} \text{ А/см}^2 \cdot \text{В}^{3/2}$. Нами был проведен предварительный расчет на ЭВМ траекторий электронов с учетом пространственного заряда. На рис. 11 приведены эквипотенциали для $U_a = 10 \text{ кВ}$ и $j = 3 \text{ мА/см}^2$

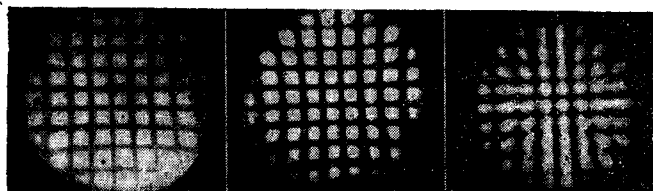


Рис. 8. Тест-объект при различных уровнях световой загрузки I фотокатода экспериментального ЭОП:
 $I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 5 : 25$; $U_a = 35 \text{ кВ}$.

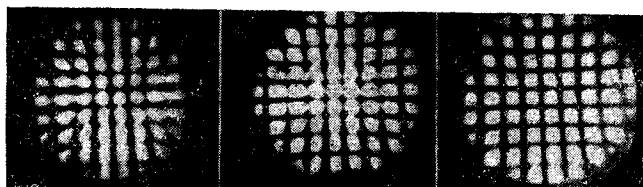


Рис. 9. Уменьшение искажений при увеличении U_a :
 $1 - U_a = 35 \text{ кВ}$; $2 - 45 \text{ кВ}$; $3 - 60 \text{ кВ}$ (уровень световой загрузки соответствует последнему кадру рис 9).

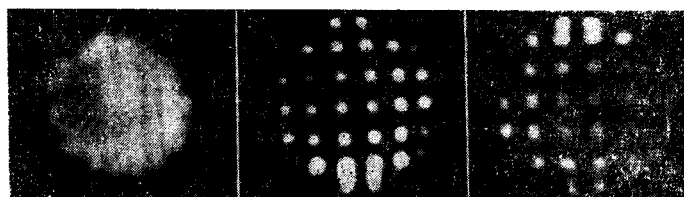


Рис. 10. Фотографии тест-объекта, полученные с помощью обычного ЭОП (условия эксперимента такие же, как и для рис. 9).

[такая величина j в три раза меньше j_n , определенного из (4)]. Из этого рисунка следует, что наибольшее возмущение эквипотенциали претерпевают вблизи фотокатода и, следовательно, прикатодная область ответственна за возникающие искажения изображения. На рис. 12 показано рассчитанное для этого случая «изображение». Характер искажений соответствует наблюдаемому в эксперименте (см. рис. 8). Расчет траекторий электронов при $U_a = 10 \text{ кВ}$ и $j = 1,5 \text{ мА/см}^2$ показывает, что в этом случае величина искажений незначительна. Поэтому можно предложить критерий, при выполнении которого влиянием пространственного заряда на качество изображения можно пренебречь:

$$j \lesssim 0,1 \cdot j_n, \text{ или } j \lesssim 10^{-9} \cdot U_a^{3/2}.$$

В настоящее время проводятся дополнительные расчеты с целью определения зависимости коэффициентов дисторсии от j и U_a .

Обсуждение результатов. Таким образом, мы рассмотрели геометрические искажения изображения, связанные с наличием потенциального рельефа на фотокатоде и влиянием пространственного заряда. В стационарном режиме искажения, возникающие из-за большого поверхност-

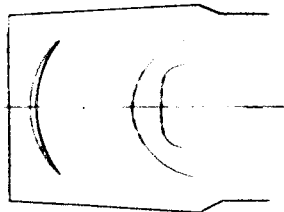


Рис. 11. Возмущение эквипотенциалов при наличии пространственного заряда (невозмущенные эквипотенциалы показаны тонкими линиями).

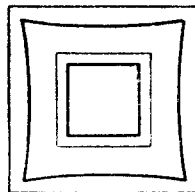


Рис. 12. Рассчитанное с учетом влияния пространственного заряда «изображение» тест-объекта (тонкими линиями показано исходное «изображение»).

ного сопротивления фотокатода, ограничивают верхний предел освещенности, при которой ЭОП работает нормально. Например, если $U_a = 20$ кВ, $R = 2$ см, $g_0 \sim 5 \cdot 10^7$ Ом/квадрат, верхним пределом освещенности будет та, при которой величина фототока составляет 0,2 мкА. В импульсном режиме, когда необходимо отбирать большие плотности фототока, кроме того, возникают ограничения, связанные с влиянием пространственного заряда.

Существуют и другие эффекты, ухудшающие качество изображения в ЭОП, но те искажения, с которыми мы встречались, получили, с нашей точки зрения, вполне разумное объяснение привлечением этих двух факторов.

Заметим, что в ЭОП, предназначенных для работы в импульсном режиме, нет необходимости снижать величину поверхностного сопротивления фотокатода меньше некоторого значения. Действительно, максимальная величина анодного напряжения определяет предельную плотность фототока. Используя условие (3), можно найти то значение поверхностного сопротивления, которое уже не влияет на качество изображения. Покажем это на примере. Пусть для ЭОП типа ЗИМ предельная амплитуда анодного напряжения в импульсном режиме $U_a = 100$ кВ. В этом случае $j_n = 10^{-8} \cdot (10^5)^{3/2} \approx 0,3$ А/см². Радиус активной части фотокатода в этой конструкции не может быть больше 2 см. Тогда из (3) следует, что g_0 должно быть меньше 150 Ом/квадрат. Если даже считать, что принятое нами значение k занижено на порядок, то и в этом случае величина удельного поверхностного сопротивления фотокатода 6 Ом/квадрат, полученная в экспериментальных макетах, достаточна для того, чтобы его влиянием на качество изображения можно было пренебречь. В этих приборах искажения изображения определяются присутствием пространственного заряда, устранить который можно только повышением напряженности поля вблизи фотокатода.

Отметим в заключение, что для кадровой съемки более перспективными электронно-оптическими преобразователями являются бипланарные

ЭОП, которые при том же анодном напряжении имеют почти на порядок большую напряженность поля вблизи фотокатода и в несколько раз меньшую величину времени пролета электронов. В тех же случаях, когда не удается избежать применения ЭОП с иммерсионными линзами (например, в системах с хронографической разверткой), необходимо использование схем импульсного питания с амплитудой анодного напряжения порядка сотен киловольт.

Авторы признательны Б. А. Барышеву за помощь в изготовлении экспериментальных ЭОП, а также Л. М. Диаманту и И. Н. Зайделю за постоянный интерес к работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. K. Zavoiskii and S. D. Fantshenko. Image Converter High-Speed Photography with 10^{-9} — 10^{-11} sec Time Resolution.— *Applied Optics*, 1965, v. 4, № 9.
2. В. М. Ефимов, А. М. Искольдский, Д. Г. Фризен. О флюктуациях контраста в пороговых изображениях.— *Автометрия*, 1971, № 6.
3. Ю. В. Бондаренко, В. А. Ганин, А. М. Искольдский, Ю. А. Шапиро. Образование потенциального рельефа на фотокатоде электронно-оптического преобразователя и расчет его влияния на качество изображения.— Труды III Всесоюзного семинара по методам расчета электронно-оптических систем. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1970.
4. Ю. В. Бондаренко, В. П. Ильин, Г. С. Попова. О численных расчетах траекторий электронов в электронно-оптических преобразователях.— *Автометрия*, 1971, № 6.

*Поступила в редакцию
5 февраля 1971 г.*