

УДК 621.385.833

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЭФФЕКТОВ В ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Ю. В. Куликов

НИИ электронных приборов, Москва, Россия

*Подробный экспериментальный и компьютерный анализ основных факторов, влияющих на временное разрешение фемтосекундных электронно-оптических камер с магнитной фокусировкой был сделан в известной работе Kinoshita [1]. Изучалось влияние собственного заряда пучка, ширины фотокатода, скорости развертки изображения, ускоряющего напряжения и некоторых других факторов. В данной работе представлены результаты аналогичной попытки автора повторить компьютерный анализ влияния перечисленных факторов (кроме объемного заряда) на временное разрешение фемтосекундной камеры с магнитной фокусировкой. Сравнение полученных результатов с данными работы [1] указывает на их удовлетворительное соответствие. Результаты могут быть полезными при создании электронно-оптических камер для регистрации быстропротекающих процессов.*

Актуальная проблема продвижения порога временного разрешения времяанализирующих электронно-оптических камер в пикосекундную область вызывает необходимость исследования влияния на временное разрешение всех достаточно значимых факторов. Временное разрешение зависит в первую очередь от факторов, влияющих на параметры входящего в состав камеры времяанализирующего электронно-оптического преобразователя (ЭОП). К их числу следует отнести скорость развертки изображения, кулоновское взаимодействие электронов в пучке, размеры фотокатода, распределение начальных скоростей фотоэлектронов, время пролета пучка от фотокатода до приемника изображения, увеличение, абберации электронно-оптической системы, частотно-контрастную характеристику люминесцентного экрана, форму временного сигнала и ряд других. Экспериментальное исследование влияния этих факторов на временное разрешение по отдельности является чрезвычайно сложным и по ряду из них практически неосуществимым. По-видимому, это тот случай, когда компьютерное моделирование процесса формирования изображения (при использовании достаточно адекватной физико-математической модели) представляется наиболее предпочтительным. В качестве классического образца подобных исследований можно привести работу, выполненную группой К. Kinoshita [1]. В этой работе компьютерные исследования проводились для конкретного ЭОП с магнитной фокусировкой. В основу используемой физико-математической модели было положено решение системы уравнений движения высокого порядка. Эта система позволяет найти временную функцию рассеяния путем вычисления траекторий движения каждого отдельного электрона в составе короткого электронного импульса, эмиттируемого фотокатодом заданной ширины, с учетом внешнего электромагнитного поля, разброса начальных скоростей фотоэлектронов и кулоновского взаимодействия в пучке. В предлагаемой работе сделана попытка частично повторить компьютерные исследования группы К. Kinoshita на основе несколько другой физико-математической модели. В этой модели вместо непосредственного решения системы уравнений движения, что, по-видимому, требует значительных вычислительных ресурсов, используется абберационное представление для траекторий заряженных частиц, позволяющее с использованием т. н. метода "насыпки" построить весьма эффективную вычислительную процедуру для компьютерного моделирования процесса формирования изображения в ЭОП с электромагнитной фокусировкой. Впервые для целей компьютерного моделирования процесса формирования изображения в ЭОП с быстрой разверткой изображения этот подход был намечен автором в работе [2]. Приведенные ниже результаты получены только для предельного случая, когда кулоновским взаимодействием в электронном

пучке можно пренебречь. Малость кулоновского взаимодействия в пучке позволяет в вычислительных процедурах эффективно использовать понятия пространственно-временного изопланатизма и оценивать временное разрешение не только через пространственно-временную функцию рассеяния, но и с помощью пространственно-временной частотно-контрастной характеристики (ПВЧКХ). В области существенного влияния объемного заряда, как показано в работе [1], задача достаточно эффективно может быть решена и экспериментально. Заметим, что в этой работе для снижения кулоновского эффекта предлагается расположить отклоняющую систему непосредственно за ускоряющей сеткой и перед магнитной линзой. Аналогичная идея была использована группой изобретателей с участием автора в авторском свидетельстве на изобретение времяанализирующего электронно-оптического преобразователя [3].

На рис. 1 приведена схема электронно-оптического преобразователя с магнитной фокусировкой изображения, прототип которой заимствован из работы [1]. Бронированная магнитная линзы выполнена в виде осесимметричной катушки возбуждения, заключенной в магнитопровод с немагнитным зазором. Расстояние между фотокатодом и экраном  $z_s = 268$  мм, расстояние между фотокатодом и ускоряющей мелкоструктурной сеткой  $z_m = 1,6$  мм, и ее потенциал относительно фотокатода  $U = 10$  кВ были взяты из упомянутой работы. Параметры магнитной линзы, не указанные в [1] (положение магнитной линзы, диаметр канала, ширина немагнитного зазора и магнитодвижущая сила — МДС, подбирались такими, чтобы обеспечить острую фокусировку изображения в плоскости экрана и с графической точностью приблизить осевое распределение магнитного поля к осевому распределению, приведенному в работе [1]. Параметры фотокатода принимались такими же, как в упомянутой работе (наиболее вероятная энергия фотоэлектронов  $\epsilon_0 = 0,34$  эВ, угловое распределение ламбертовское, ширина фотокатода  $b = 0,01$  мм, длина фотокатода  $l = 0,23$  мм), длительность светового импульса 100 фс также была взята из этой работы. В качестве меры временного разрешения так же как и в [1] принималась ширина функции рассеяния на половине ее высоты.

Ниже приведены результаты расчета некоторых характеристик рассматриваемого ЭОП, а также значения временного разрешения, полученных как расчетным, так и экспериментальным путем в работе [1] для прототипа.

Увеличение в центре, $M_0$ .....	2,9
МДС, $I\ell$ , ампер-витки .....	750
Расстояние от фотокатода до экрана $z_s$ , мм .....	268
Изотропная дисторсия на краю ( $1/2 = 0,115$ мм), мА, % .....	0,1
Длительность светового импульса $t$ , фс .....	100
Время пролета электронного пакета до экрана $T$ , с .....	$4,54 \cdot 10^{-9}$
Скорость развертки $v_s$ , мм/с .....	$1,6 \cdot 10^{11}$
Магнитное поле на оси в максимуме $B_{max}$ , Тл .....	0,017
Временное разрешение в центре $\Delta t$ , фс .....	460
Временное разрешение прототипа в центре, фс:	
расчет .....	450
эксперимент .....	600

Нетрудно видеть, что используемые как авторами [1] так и в данной работе физико-математические модели дают практически совпадающие результаты, причем весьма близкие к эксперименту. Хорошее соответствие эксперименту можно рассматривать также как положительный результат тестирования используемых моделей. Таким образом, приведенные результаты компьютерных исследований, по мнению автора, могут претендовать на объективность. По-видимому, единственным существенным отличием между собой упомянутых вычислительных процедур может быть их производительность. Так, применяемые автором вычислительные процедуры на персональном компьютере средней производительности (100—200 МГц) позволяют получить все рассчитываемые характеристики ЭОП для одного варианта входных данных за 1—2 мин, аналогичных оценок в работе [1], к сожалению, не приведено.

При проектировании фемтосекундных камер возникает ряд практических вопросов, ответ на некоторые из них, как отмечалось выше, удастся получить путем компьютерного анализа. На практике могут возникнуть различные требования к временному разрешению в центре фотокатода и на его краю, например, требование обеспечить равномерное временное разрешение по всему рабочему полю фотокатода, либо наоборот, требуется получить максимальное временное разрешение в центре независимо от разрешения на краю. Удовлетворение этих требований может быть достигнуто либо за счет соответствующего выбора плоскости установки экрана (или режима фокусировки изображения), либо за счет оптимизации формы и положения поверхностей кривизны изображения. Далее во всех результатах компьютерного анализа, если это специально не оговорено, скорость развертки составляет  $1,6 \cdot 10^{11}$  мм/с, ширина фотокатода равна нулю, наиболее вероятная энергия равна 0,2 эВ, ускоряющее напряжение на сетке равно 10 кВ, МДС равна 750 а.-в. (ампер-витки), а временное разрешение определяется с помощью ПВЧКХ на уровне 5 % контраста в развернутом на экране изображении временного аналога пространственного тест-объекта в виде синусоидальной временной миры.

На рис. 1 приведены сечения поверхностей меридианной и сагиттальной кривизны изображения и на рис. 2 распределение временного разрешения в центре и на краю вдоль оси рассматриваемого ЭОП в зависимости от МДС катушки возбуждения. Различие разрешения в центре и на краю фотокатода (см. рис. 2) объясняется влиянием меридианной кривизны изображения. Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что из-за кривизны изображения равномерное разрешение по полю удастся получить с помощью перефокусировки изображения и ценой некоторого ухудшения временного разрешения в центре фотокатода. Малые вариации плоскости установки экрана эквивалентны вариациям фокусировки и здесь не рассматриваются. Корректировка кривизны изображения, как известно, может быть достигнута либо за счет искривления поверхности фотокатода, либо за счет существенного изменения конструкции электронно-оптической системы. Весьма важным фактором, влияющим на временное разрешение, является разброс скоростей фотоэлектронов. На рис. 3 дана зависимость временного разрешения от значения наиболее вероятной энергии фотоэлектронов. Как видно из рис. 3 уменьшение значения этой величины теоретически позволяет существенно продвинуться в фемтосекундный диапазон. Однако, помимо трудностей создания эффективного фотокатода с достаточно узким энергетическим спектром фотоэлектронов, может возникнуть дополнительное препятствие на этом пути. Так, в ряде фундаментальных исследований последних лет [4,5] утверждается, что при нулевой начальной энергии фотоэлектронов в результате кулоновского взаимодействия возникает эффект, подобный эффекту мыльного пузыря, когда сплошной электронный пакет в процессе движения к экрану раздваивается на два независимых разлетающихся друг от друга пакета. Раздвоение пакета приводит к ложным фотоотсчетам в системе регистрации, что эквивалентно ухудшению временного разрешения. Описанный эффект, как представляется, требует своего экспериментального подтверждения и, возможно, уточнения исходной постановки задачи. Поэтому на рис. 3 результаты компьютерного анализа в области малых энергий фотоэлектронов, полученные без учета этого эффекта, даны пунктиром. На рис. 4 представлена зависимость временного разрешения от скорости развертки. Из рис. 4 нетрудно видеть, что при скорости развертки превышающей  $1,6 \cdot 10^{11}$  мм/с временное разрешение в рассматриваемом ЭОП изменяется незначительно. Некоторый резерв продвижения в фемтосекундный диапазон лежит в области создания высокой напряженности электрического поля на поверхности фотокатода. На рис. 5 представлена зависимость временного разрешения от напряжения на ускоряющей сетке. Для того чтобы сохранить размер кадра по временной оси, скорость развертки для каждого значения напряжения вычислялась по формуле

$$v_s(U) = 1,6 \cdot 10^{11} (0,1U)^{1/2} \text{ мм/с,}$$

где  $U$  задается в киловольтах.

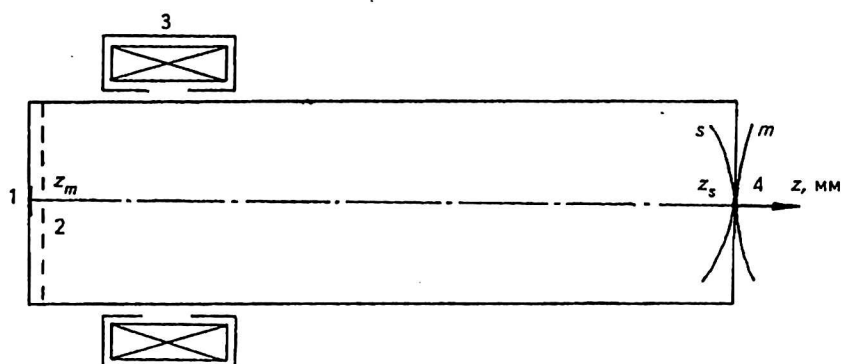


Рис. 1. Схема электронно-оптического преобразователя с магнитной фокусировкой изображения, прототип которой заимствован из работы [1]:

1 — фотокатод; 2 — сетка; 3 — магнитная линза; 4 — люминесцентный экран:  $m$  — поверхность меридианной кривизны изображения;  $s$  — поверхность сагиттальной кривизны изображения

Рис. 2. Распределение временного разрешения в центре и на краю вдоль оси ЭОП в зависимости от МДС катушки возбуждения:

1 — центр; 2 — край (на радиусе 0,115 мм)

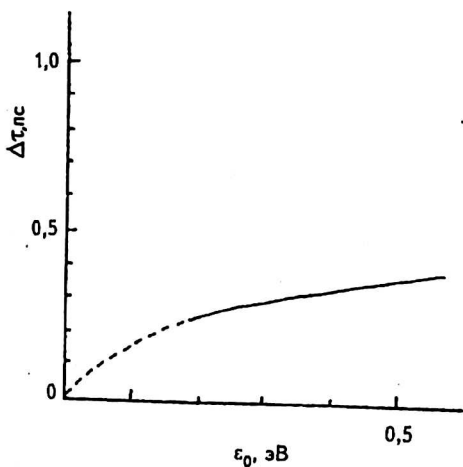
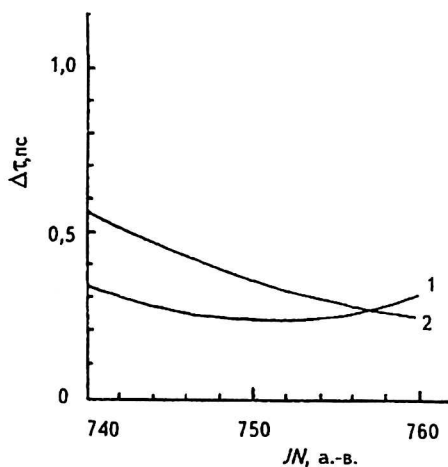


Рис. 3. Зависимость временного разрешения от значения наиболее вероятной энергии фотоэлектронов

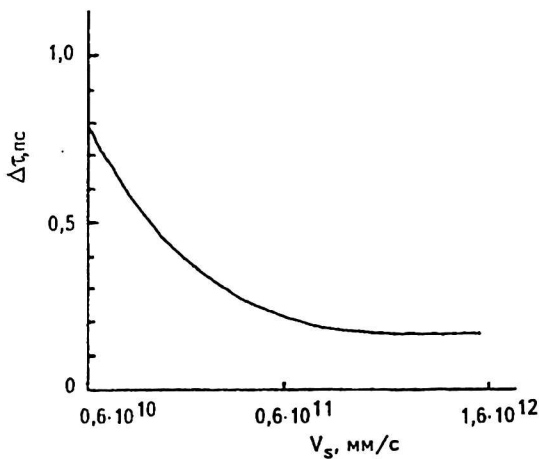
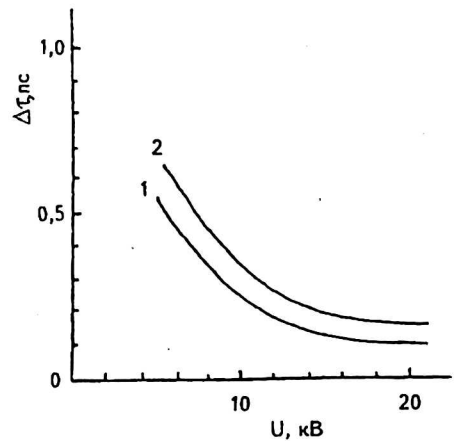


Рис. 4. Зависимость временного разрешения от скорости развертки

Рис. 5. Зависимость временного разрешения от напряжения на ускоряющей сетке: 1 — центр; 2 — край (на радиусе 0,115 мм)



Как видно из рис. 5, повышение напряжения до величины 20 кВ в ЭОП с фотокатодом, имеющим достаточно малый энергетический разброс фотоэлектронов ( $\epsilon_0 = 0,2$  эВ) и нулевую ширину, позволяет получить временное разрешение порядка 120 фс. Интересно также выявить в чистом виде влияние на временное разрешение ширины фотокатода. На рис. 6 дана зависимость временного разрешения от ширины фотокатода. Временное разрешение здесь определялось через ширину пространственно-временной функции рассеяния на половине высоты. Как показывают результаты компьютерного анализа, если учесть совместное влияние рассмотренных выше параметров ЭОП, выбрав их на грани практической реализации ( $\epsilon_0 = 0,2$  эВ,  $U = 20$  кВ,  $v_s = 2,26 \cdot 10$  мм/с,  $b = 0,01$  мм), то при малой световой нагрузке на фотокатод, исключающей заметный кулоновский эффект, можно ожидать достижения в центре фотокатода рассматриваемого ЭОП теоретического временного разрешения порядка 160 фс.

В заключение автор считает своим долгом отметить вклад акад. М. Я. Щелева, инициировавшего в свое время поиск технически реализуемых путей повышения временного разрешения времяанализирующих камер методами компьютерного моделирования, а также поблагодарить В. А. Тарасова и С. В. Андреева, составивших компьютерную программу.

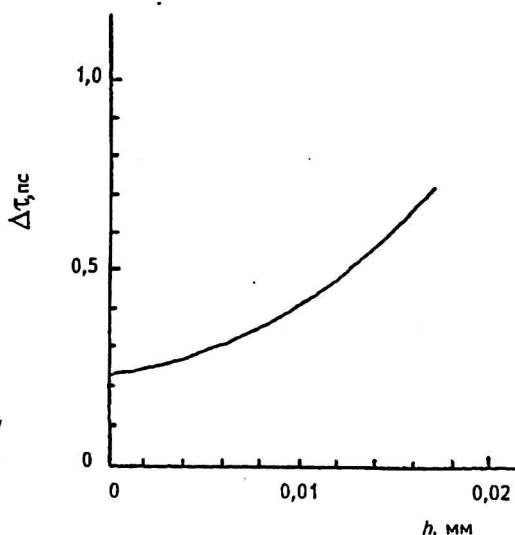


Рис. 6. Зависимость временного разрешения от ширины фотокаатода

## Литература

1. Kinoshita K, Ito M, Suizama M. Analysis of space charge effects in the femtosecond streak tube.— SPIE Vol-981. High Speed Photography // Videography and Photonics. 1988. V. 1.
2. Дашевский Б. Е., Куликов Ю. В., Щелев М. Я. Проектирование времяанализирующих электронно-оптических камер // ОМП, 1988, 1. С. 54 ; Радиотехника и Электроника, 1966. Т. 11. С. 6.
3. Дашевский Б. Е., Куликов Ю. В., Мечетин А. М., Монастырский М. А., Прохоров А. М., Щелев М. Я. Времяанализирующий электронно-оптический преобразователь изображения // Бюллетень изобретений. 1986. № 43.
4. Монастырский М. А. Метод т-вариаций и некоторые вычислительные проблемы электронной оптики динамических эмиссионных систем // Прикладная физика, 1996. Вып. 3. С. 7.
5. Быков В. П., Герасимов А. В., Турин В. О., Кулоновская дезинтеграция слабых электронных потоков и фотоотсчеты // Успехи физических наук. Т. 165. № 8. С. 955.

## ANALYSIS OF SOME EFFECTS IN THE FEMTOSECOND STREAK TUBE BY COMPUTER SIMULATION

Yu. V. Kulikov

Research Institute for Electron Devices, Moscow, Russia

*The space charge effects and others in the magnetic focusing femtosecond streak tube have been analyzed by some experiments and computer simulation Kinoshita and al. [1]. It was clarified considerably deteriorated temporal resolution inducing by space charge effects and the same causes. In this article as well as [1] the results of the analyses some causes except space charge effects by means of the computer simulations are presented. The effects of energy distribution and angular distribution photoelectrons emitted from photocathode, sweep speed, width photocathode along the sweep direction, the electron magnification, the luminescent screen position, the accelerating voltage between photocathode and mesh are considered. The results were according to [1] and they may be useful for designing streak camera tubes too.*