

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ****Осциллографические трубки для записи
быстропротекающих процессов****В. И. Вознесенский, Н. В. Коротких,
А. В. Чернетский, А. С. Копорский****ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важнейших задач современной науки является исследование процессов, протекающих в чрезвычайно короткие промежутки времени — в миллиардные и меньшие доли секунды. Изучение таких явлений с помощью обычных осциллографов наталкивается на ряд принципиальных трудностей.

Дело в том, что при уменьшении периода повторения процессов или их длительности приходится сталкиваться с совершенно новыми явлениями, значительно затрудняющими их индикацию. Сюда прежде всего следует отнести: снижение чувствительности и искажение изображения за счет пролетного эффекта в осциллографических трубках, искажение сигнала из-за рассогласования импедансов в местах перехода сигнала в отклоняющую систему и за счет паразитных связей между отклоняющими системами; уменьшение яркости изображения при повышении скорости записи; недостаточную разрешающую способность обычных трубок, недостаточную широкополосность и стабильность усилителей обычных осциллографов и т. д. Эти и другие ограничения делают по существу невозможным применение обычных типов осциллографов на частотах более 5—10 мГц и для наблюдения импульсов длительностью менее нескольких долей мксек.

За последнее время у нас и за границей были разработаны новые типы осциллографов, позволившие значительно расширить диапазон измерений в сторону более кратковременных процессов. Это было достигнуто не только и даже не столько за счет усовершенствования старых методов, но, в основном, за счет разработки принципиально новых методов осциллографирования *). Значительные изменения были также внесены в схемы усилителей, генераторов развертки и в различные вспомогательные устройства осциллографов.

В обзоре, охватывающем последнее десятилетие, рассматриваются основные методы осциллографирования быстропротекающих процессов, а также некоторые характерные для скоростных электронно-лучевых трубок вопросы, как получение тонкого электронного луча, послеускорение, и т. д.

*) Поскольку метод отклонения электронного луча во многом определяет высокочастотный предел измерения осциллографов и накладывает определенные требования на всю конструкцию трубки и схемы основных узлов осциллографов, то под методом осциллографирования здесь понимается в основном метод отклонения.

§ 1. МЕТОДЫ СКОРОСТНОЙ ОСЦИЛЛОГРАФИИ

Отклоняющие системы. Ограничения обычных отклоняющих систем на СВЧ

Прежде чем перейти к рассмотрению новых методов наблюдения быстропеременных процессов, целесообразно несколько подробнее остановиться на ограничениях, которые имеют обычные отклоняющие системы на СВЧ^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}.

Система отклонения обычных трубок представляет собой две пары параллельных пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях *). На рис. 1 представ-

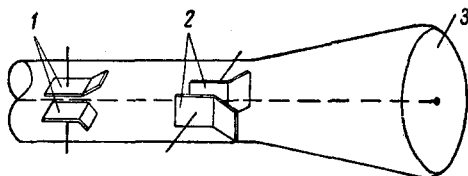


Рис. 1. Обычная электростатическая отклоняющая система.

лен вид такой системы. На одну пару пластин подается исследуемый сигнал, другая пара пластин используется для развертки этого сигнала во времени.

При низких частотах исследуемого напряжения (или при больших длительностях импульсов), когда время пролета элект-

тронов между отклоняющими пластинами много меньше периода изменения напряжения на пластинах, отклонение луча строго пропорционально приложенной к ним разности потенциалов. Величина отклонения в этом случае может быть определена из выражения

$$A_0 = \frac{lL}{2dV} U_0 \cos \omega t,$$

где $U_0 \cos \omega t$ — изучаемое напряжение (е), l — длина пластин (см), L — расстояние между пластинами (см), V — потенциал луча (е) (ускоряющее напряжение), d — расстояние между отклоняющими пластинами.

Из этого выражения видно, что величина отклонения изменяется со временем по тому же закону, что и поле, без сдвига фаз. Чувствительность отклонения или величина отклонения на единицу отклоняющего напряжения $a_0 = \frac{lL}{2dV}$ не зависит от частоты.

При высоких частотах, когда время пролета электронов соизмеримо с периодом изменения отклоняющего поля, величина отклонения изменяется по более сложному закону:

$$A(\omega) = \frac{lL}{2dV} U_0 \cos \left(\omega t_0 + \frac{\omega \Delta t}{2} \right) \cdot \frac{\sin \left(\frac{\omega \Delta t}{2} \right)}{\frac{\omega \Delta t}{2}},$$

где Δt — время пролета электронами поля отклоняющих пластин.

При этом наблюдается сдвиг фаз между отклонением и отклоняющим напряжением, равный $\frac{\omega \Delta t}{2}$. Отношение амплитуды отклонения в быстропеременных полях к амплитуде отклонения в медленно меняющихся полях равно

$$\frac{A(\omega)}{A_0} = \frac{\sin \left(\frac{\omega \Delta t}{2} \right)}{\left(\frac{\omega \Delta t}{2} \right)}.$$

*) Трубки с магнитным отклонением принципиально не пригодны для индикации сверхвысоких частот, и потому рассматриваться не будут.

Соотношение между статической и динамической чувствительностями имеет вид

$$a(w) = a_0 \frac{\sin\left(\frac{w\Delta t}{2}\right)}{\left(\frac{w\Delta t}{2}\right)},$$

т. е. чувствительность отклонения пропорциональна отношению синуса половины угла пролета сквозь отклоняющие пластины к половине этого же угла. Так, например, при угле пролета 0,794 радиана отношение динамической чувствительности к статической равняется 0,9; при угле пролета 2,78 радиана это отношение равно приблизительно 0,7, а при угле пролета, равном 2π , отношение становится равным нулю.

На рис. 2 представлена зависимость чувствительности отклонения от частоты, рассчитанная Холмэном для случая $V=1000$ в и длине отклоняющих пластин ($l=2$ см)⁸. Из рисунка видно, что при данных размерах отклоняющих пластин чувствительность отклонения резко падает, начиная с частот порядка 10^8 гц. При частоте $6 \cdot 10^8$ гц чувствительность падает до 50% своей первоначальной величины, а при частоте $1 \cdot 10^9$ гц падает до нуля. При этом необходимо иметь в виду, что расчет производился без учета поля рассеивания. При учете этого фактора частотная характеристика системы ухудшается.

Таким образом, даже для наблюдения гармонических колебаний при частотах выше $1 \cdot 10^8$ гц возникают серьезные трудности.

Еще хуже обстоит дело с негармоническими и особенно импульсными сигналами, имеющими в своем спектре составляющие очень высоких частот. Для того чтобы получить неискаженное изображение импульса с длительностью фронта τ_{ϕ} , необходимо воспроизвести все гармонические составляющие, лежащие в полосе частот по крайней мере $\frac{1}{\tau_{\phi}}$, а для воспроизведения сигнала экспоненциальной формы необходимо, чтобы постоянная времени экспоненты по крайней мере в шесть раз превышала время пролета электронов между отклоняющими пластинами. При несоблюдении этих условий возникают значительные искажения изображения из-за различной чувствительности отклонения для разных гармоник.

Другим ограничением, с которым приходится сталкиваться при использовании обычных осциллографов для наблюдения быстропротекающих процессов, являются искажения, возникающие за счет значительных емкостей между отклоняющими пластинами и из-за паразитных связей между двумя парами пластин. Обычные осциллографические трубки имеют довольно большие значения емкостей между отклоняющими пластинами (порядка 5—10 пф). При таких значениях емкостей на высоких частотах начинает сказываться время зарядки, которое можно приблизительно оценить с помощью «постоянной заряда», равной произведению емкости, пластин на внутреннее сопротивление источника сигнала *).

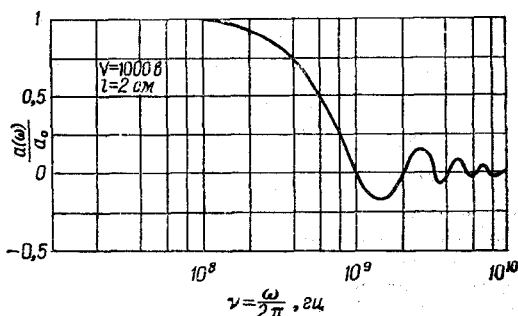


Рис. 2. Зависимость динамической чувствительности обычной отклоняющей системы от частоты.

*) Полное время зарядки конденсатора $\sim 5RC$.

Время зарядки для обычных трубок сравнимо с длительностью импульсов, что приводит к удлинению их фронтов.

Уменьшение емкостного сопротивления отклоняющих пластин с увеличением частоты приводит к тому, что напряжение на них в течение времени зарядки становится меньше, чем у источника. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению чувствительности на высоких частотах для гармонических сигналов и к искажению изображения сигналов, содержащих высшие гармоники.



а)



б)

Рис. 3. Искажения изображения импульса из-за паразитных связей между отклоняющими пластинами.

В результате паразитных связей между двумя парами отклоняющих пластин и их вводами наблюдается модуляция высокочастотного напряжения, приложенного к одной паре пластин, другим высокочастотным напряжением, приложенным к другой паре пластин. При этом скорость движения луча в горизонтальном направлении (ось времени) во время действия на вертикальные пластины переднего фронта исследуемого сигнала может уменьшаться, а во время действия заднего фронта, наоборот, увеличивается.

Типичная картина, получаемая в этом случае на экране, показана на рис. 3.

Серьезные затруднения возникают также из-за расогласования импеданцев в местах перехода сигнала на отклоняющие пластины. Получающиеся при этом отраженные волны накладываются на исследуемый сигнал, вызывая тем самым искажение его изображения. Согласование отклоняющей системы с генератором имеет важное значение также для получения стабильных по частоте и мощности сигналов.

Очень важное значение для скоростной осциллографии имеют также такие вопросы, как получение тонкого электронного луча с большой плотностью тока и эффективных люминофоров.

Из сказанного ясно, что высокочастотный предел электронно-лучевых трубок будет определяться тем, насколько полно будут разрешены все эти проблемы.

Для уменьшения пролетного времени можно уменьшать длину отклоняющих пластин и увеличивать скорость электронов луча, однако это ведет к снижению чувствительности. Поэтому при конструировании скоростных трубок приходится идти на известный компромисс между необходимостью иметь малое значение пролетного времени и необходимостью иметь достаточную чувствительность отклонения.

Применение высоких ускоряющих напряжений диктуется также необходимостью иметь высокую скорость записи. Так, например, при пятикратном увеличении ускоряющего напряжения достигается увеличение максимальной скорости записи в 15—20 раз. В большинстве современных высокоскоростных осциллографических трубок для увеличения энергии электронов применяется так называемое послеускорение, т. е. дополнительное ускорение электронов луча после прохождения ими отклоняющей системы. С помощью послеускорения в трубке удастся совместить такие противоречивые условия, как большую энергию электронов, и, следовательно, большую скорость записи, и значительную чувствительность отклонения. Уменьшение емкости и паразитных связей между пластинами и вводами достигается уменьшением длины пластин, укорочением вводов и впакой их не через общий цоколь, а непосредственно в колбу трубки, тщательной экранировки одной пары пластин от другой и т. д. Эти усо-

вершенствования позволяют значительно расширить частотный диапазон измерения современных электронно-лучевых трубок.

Рассмотрим несколько образцов высокоскоростных трубок с отклоняющей системой в виде пластин. Типичными трубками такого рода являются трубки ГЕС типа 908ВСС и 1608ВССА, описанные в литературе^{9, 10}. На рис. 4 представлены фотографии этих трубок. Первая трубка работает при ускоряющем напряжении 10 кВ и не имеет послеускорения. Максимальная скорость записи, достигнутая в этой трубке, составляет около $3 \cdot 10^6$ см/сек. Диаметр пятна на экране $0,2 \div 0,25$ мм. Чувствительность отклонения $4 \div 4,5 \cdot 10^{-2}$ мм/в. Столь малая чувствительность делает невозможным использование этой трубки при сигналах, меньших 100 в. Напряжение развертки трубки составляет 2,5 кВ. По подсчетам такая

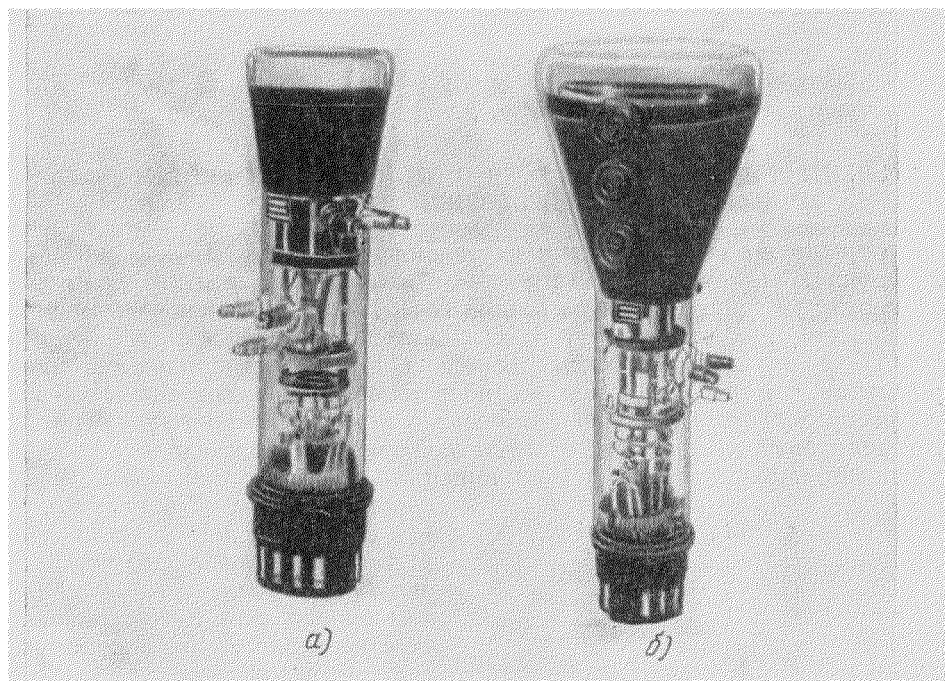


Рис. 4. а) Катодно-лучевая трубка ГЕС типа 908ВСС. б) катодно-лучевая трубка ГЕС типа 1608ВССА с послеускорением.

трубка может удовлетворительно работать вплоть до частот порядка $200 \div 300$ мГц.

Вторая трубка сконструирована с послеускорением. Электроны луча вначале ускоряются потенциалом в 3 кВ, а затем, после прохождения системы отклонения, дополнительно ускоряются с помощью трех колец послеускорения до потенциала 7 кВ. Чувствительность трубки $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм/в. Это позволяет наблюдать сигналы с амплитудой напряжения 40 в. Напряжение развертки трубки — 700 в. Диаметр пятна на экране около 0,5 мм. Однако эта трубка имеет меньшую скорость записи ($1 \cdot 10^9$ см/сек) и более низкочастотный предел (100—150 мГц).

Приведенные примеры показывают, что с помощью усовершенствования конструкции и режима работы осциллографических трубок с отклоняющей системой в виде пластин можно добиться значительного расширения диапазона измерения быстропротекающих процессов. Однако при

оценке приведенных данных следует помнить, что они получены без учета емкостных и иных факторов, которые намного снижают эффективность их применения на высоких частотах. Низкая чувствительность этих трубок накладывает весьма жесткие требования на усилители и генераторы разверток: необходим большой коэффициент усиления, большие выходные напряжения и достаточная широкополосность. Кроме того, в этих конструкциях остается нерешенным вопрос о согласовании источников сигнала с отклоняющей системой. Учитывая все это, можно сказать, что высокочастотным пределом для трубок с отклоняющей системой в виде параллельных пластин являются частоты порядка $600 \div 800$ мГц.

Перейдем теперь к рассмотрению электронно-лучевых трубок, которые были разработаны за последние годы специально для осциллографирования быстротекущих процессов. Несомненно, все те трудности и ограничения, которые были отмечены в этом параграфе, учитывались при создании этих трубок и в той или иной мере были преодолены, что позволило значительно расширить диапазон пропускаемых частот, увеличить чувствительность трубок и т. д.

§ 2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ С ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ В ВИДЕ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Стремление свести к минимуму время пролета электронов сквозь отклоняющую систему привело к мысли использовать для отклонения электронного луча двухпроводную линию (рис. 5). Кроме уменьшения времени пролета, при этом достигается значительное уменьшение емкости и улучшение согласования отклоняющей системы с источником сигнала и развертки, так как такая система представляет для высокочастотной волны распределенный импеданс в виде двухпроводной передающей линии. Это позволяет один конец отклоняющей системы подсоединить к испытательной аппаратуре, а другой конец нагрузить характеристическим сопротивлением. Кроме того, такая система может легко настраиваться на резонанс, что позволяет получить значительные отклоняющие напряжения. Естественно, что чувствительность отклонения такой системы невелика.

Оценка ее может быть произведена по формуле ¹¹:

$$\theta = \frac{U\pi}{2V \operatorname{Arch} \left(\frac{D}{d} \right)} \approx \frac{U\pi}{2V \ln \left(\frac{2D}{d} \right)},$$

Рис. 5. Схема двухпроводной отклоняющей системы.

где U — отклоняющее напряжение (в), V — скорость электронов (в), D — расстояние между центрами линий, r — радиус проводочных линий.

Одна из трубок с отклоняющей системой в виде двухпроводной линии ¹² работала при ускоряющем напряжении 25 кВ. При этом в центральной части экрана (примерно 4 см диаметром) была достигнута максимальная скорость записи $4 \cdot 10^{10}$ см/сек при величине пятна на экране — 0,2 мм. Чувствительность отклонения по постоянному напряжению составляла всего $7 \cdot 10^{-3}$ мм/в. При частоте 10 000 мГц чувствительность падала до 30% первоначальной величины. В этой трубке применялся алюминизированный экран с чрезвычайно эффективным люминофором. Интересно применение трубки с отклоняющей системой в виде двух пар двухпроводных линий в качестве сверхскоростного лучевого анализатора ¹³, с помощью которого производилось изучение скоростной и плотност-

ной модуляции электронного луча, модулированного при частоте 3000 *мгц*, на выходе клистрона или лампы с бегущей волной. Отклоняющая система настраивалась в резонанс на частоту, которая модулирует луч. Так как электроны, имеющие разные скорости, отклоняются по-разному, то на экране получается полная картина распределения скоростей и плотности электронов в луче. В работе использовалась круговая развертка. Было достигнуто разрешение в 30 ϵ , причем авторы указывают на возможность снижения этой величины.

Осциллографы с двухпроводной отклоняющей системой являются попыткой разрешить проблему наблюдения быстропротекающих процессов. Однако благодаря малой чувствительности они не получили широкого распространения. Область их применения естественно ограничивается теми быстропротекающими процессами, напряжения которых порядка нескольких киловольт.

§ 3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ЯВЛЕНИЙ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Осциллографирование сверхвысокочастотных процессов большой мощности имеет ряд характерных особенностей, накладывающих на конструкцию трубок, предназначенных для этих целей, весьма жесткие условия. Такие трубки должны быть, во-первых, скоростными и достаточно широкополосными, и, во-вторых, должны позволять работать с сигналами большой мощности. Естественно поэтому, что изучение сверхвысокочастотных процессов большой мощности с помощью обычных скоростных трубок наталкивается на серьезные трудности. Так, например, применение специальных потенциальных делителей, необходимых в данном случае, и других вспомогательных цепей неизбежно связано с заметным искажением исследуемого сигнала. Причем эти искажения особенно велики при осциллографировании кратковременных переходных процессов.

За последнее время появились описания нескольких типов электронно-лучевых трубок, предназначенных специально для наблюдения кратковременных переходных процессов большой мощности.

Одна из таких трубок¹⁴ имела отклоняющую систему, состоящую из цилиндрического электрода 5—6 *мм* диаметром, помещенного в подобной формы экран со щелью, и расположенного напротив щели другого электрода. Экран и электрод, расположенный против щели экрана, заземлялись. Отклонение электронного луча производилось за счет поля между внутренним цилиндрическим электродом и заземленным электродом. Отклоняющая система была рассчитана на сигналы с амплитудой около 100 *кв*. Трубка работала при ускоряющем напряжении 18 *кв*. Фокусировка электронного луча производилась с помощью магнитной линзы. К сожалению, авторы трубки не указывают размеров отклоняющей системы, скорости записи и диаметра пятна на экране данной трубки.

Часто трубки подобного типа¹⁵ конструируются с двойной отклоняющей системой: одна из них обладает низкой чувствительностью, другая — нормальной, благодаря чему создается возможность наблюдения сигналов как высокого, так и низкого напряжения.

Интересный метод осциллографирования кратковременных переходных процессов большой мощности был разработан А. М. Чернушен¹⁶. Отклонение электронного луча по этому методу производится с помощью объемного резонатора, используемого в качестве отклоняющей системы. Резонатор образован двумя цилиндрическими полостями, соединенными между собой щелью. Стенки этой щели образуют сосредоточенную емкость резонатора и используются в качестве отклоняющих пластин.

Цилиндрические полости, образующие индуктивность резонатора, связаны с исследуемым источником СВЧ и нагрузкой. Подвод энергии к отклоняющей системе производится от коаксиальной линии, внешний проводник которой имеет емкостную связь с телом резонатора, а внутренний — индуктивную с петлей.

Трубка с такой отклоняющей системой была сконструирована для исследования сверхвысокочастотных колебаний импульсных магнетронов десятисантиметрового диапазона. В диапазоне 8—12 см отклоняющая система этой трубки могла пропускать не менее 90 % подводимой высокочастотной энергии. Чувствительность отклонения составляла 2 *вт* на ширину линии. На рис. 6 представлен общий вид трубки СВЧ-1 конструкции А. М. Чернушенко.

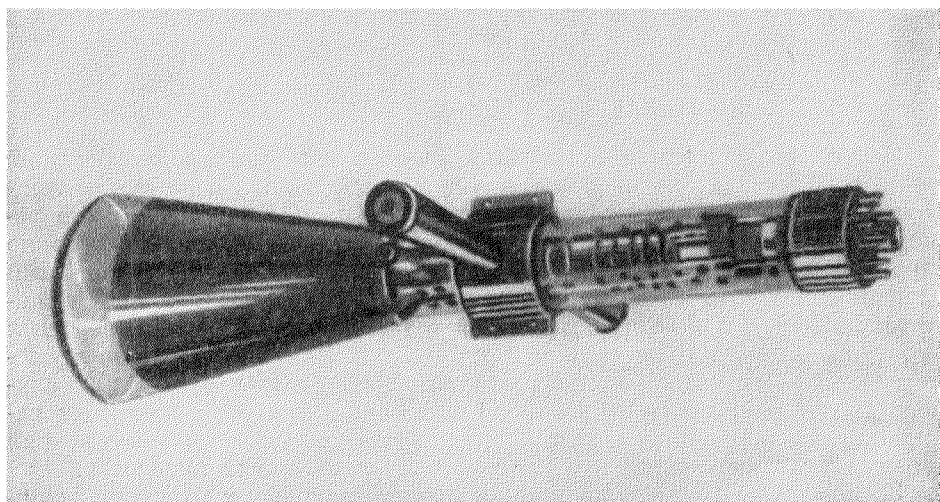


Рис. 6. Общий вид осциллографической трубки СВЧ-1.

Описанный метод осциллографирования сверхскоростных процессов имеет ряд преимуществ. К ним относятся возможность сосредоточения основной части энергии в области отклонения электронного луча, большие усиления исследуемых сигналов, относительная простота конструкции трубки, отсутствие сложных вакуумных спаев стекла с металлом и т. д. Существенным недостатком является сравнительно малая широкополосность отклоняющего устройства. Это ограничивает применение таких трубок процессами с небольшой шириной спектра.

§ 4. МИКРООСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТРУБКИ

Отличительными чертами микроосциллографических трубок являются: малые размеры отклоняющих пластин ($\sim$ мм), высокие ускоряющие потенциалы (~ 10 кэ), чрезвычайно тонкий электронный луч ($\sim 10^{-2}$ мм), малые размеры изображения, требующие дополнительного увеличения. Изображение зачастую снимается на фотопластинки, при этом трубка делается разборной, что вызывает необходимость применения откачки.

Уменьшение длины отклоняющих пластин при высоких скоростях электронов в луче позволяет значительно уменьшить время пролета электронов сквозь отклоняющую систему и уменьшить емкость между пластинами. Однако это ведет к проигрышу в чувствительности. Изображе-

ние на экране становится малым, и для его наблюдения требуется дополнительное увеличение. Кроме того, для повышения разрешающей способности прибора необходимо иметь тонкий электронный луч и мелко-структурный экран.

Использование в качестве индикатора чувствительной фотографической пластинки позволяет получать четкое изображение даже при очень высоких скоростях записи (10^9 см/сек.). Замена пластин и восстановление рабочего давления (10^{-4} — 10^{-5} мм Нг) занимает обычно не более 10—15 минут. На одну фотопластинку можно записать около 100 осциллограмм. Фокусировка электронного луча в большинстве случаев производится с помощью тщательно юстированных магнитных линз.

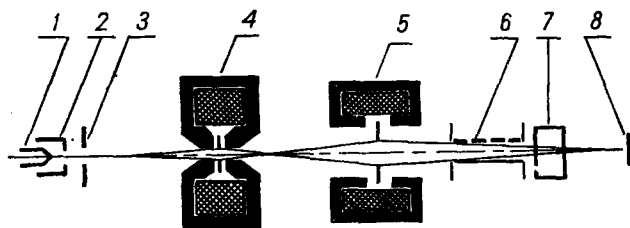


Рис. 7. Схема микроосциллографической трубки.

На рис. 7 представлена типичная схема микроосциллографической трубки. Такая трубка состоит из источника электронов (показана трех-электродная система, состоящая из игольчатого катода 1, управляющего электрода 2, анода 3) магнитной уменьшающей линзы 4, главной магнитной линзы 5, вертикальной отклоняющей системы 6, горизонтальной отклоняющей системы 7 и экрана 8. Для наладки и настройки прибора обычно имеется подъемный и люминесцентный экран, изображение на котором можно наблюдать через специальное «окно» в трубке. Между полюсами магнитных линз обычно ставятся диафрагмы.

Благодаря тому, что имеется возможность увеличивать изображение, полученное на фотопластинке, многие типы микроосциллографов позволяют работать с сигналами амплитудой порядка нескольких вольт.

Так, в первой микроосциллографической трубке, описанной Арденне в 1939 г.¹⁷, с помощью тщательной установки магнитной фокусирующей системы было получено пятно диаметром примерно 10^{-3} мм (!). Размеры отклоняющих пластин были уменьшены в 10 раз. При этом была получена осциллограмма в 100 раз меньше обычной.

В более поздних конструкциях Арденне применял комбинированную фокусирующую систему, состоящую из электрических и магнитных линз¹⁸.

Другая конструкция микроосциллографа имела отклоняющие пластины размером 5×4 мм, с расстоянием между ними 3,6 мм. Каждая пара пластин была тщательно заэкранирована, что позволило свести до минимума паразитные связи. Для улучшения фокусировки электронного луча была применена специальная фокусирующая линза, поставленная между отклоняющей системой и экраном. Чувствительность отклоняющей системы этой трубки составляла $1 \cdot 10^{-3}$ мм/в. Размер пятна на экране 10^{-2} мм. При ускоряющем напряжении 50 кэ максимальная скорость записи была равна $2 \cdot 10^9$ см/сек. Такая трубка, по расчету, могла использоваться вплоть до частот порядка 10 000 мГц. Однако осциллограммы однократных колебаний, полученные автором этой конструкции при частоте 10 000 мГц, оказались неудовлетворительными. Повидимому, на столь высоких частотах начинают сказываться такие явления, как мест-

ные резонансы, поля излучения и наложение фокусирующих и отклоняющих полей.

В другом микроосциллографе, описанном Фертм и др.²¹, также использовалась магнитная фокусировка луча. Эта трубка имела ускоряющее напряжение от 50 до 60 кВ. При этом была достигнута максимальная скорость записи $6 \cdot 10^9$ см/сек.

Трубка, описанная Пирсом²², имела отклоняющую систему, в которой пластины образовывали сосредоточенные емкости низкочастотного фильтра. Пластины соединялись индуктивностями. Получившаяся таким образом система имела низкочастотный импеданс 75 ом. Эта система была сконструирована на предельную частоту порядка 1300 мГц, однако из-за изменения характеристического импеданса с частотой и недостаточно точного подбора компонент этот предел снизился до частоты 500 мГц. Чувствительность трубки составляла $7,7 \cdot 10^{-1}$ мм/в; диаметр пятна — $2 \cdot 10^{-2}$ мм. Низкое ускоряющее напряжение (2 кВ) не позволяло использовать этот микроосциллограф для записи нестационарных процессов.

Приведенные примеры показывают, что микроосциллография позволяет расширить частотный диапазон измерения вплоть до нескольких тысяч мГц. В микроосциллографе удалось в значительной мере сгладить противоречие между необходимостью уменьшать длину отклоняющих пластин и повышать скорость электронов в луче для снижения пролетного времени и необходимость иметь достаточную чувствительность отклонения. Фотографирование изображения на чувствительную пленку с последующим увеличением в 50–100 раз позволяет работать с небольшими изображениями. Изображение получается достаточно четким благодаря очень тонкой фокусировке электронного луча и мелкоструктурному экрану. Это дает возможность производить измерения очень слабых сигналов, начиная от долей вольта. Обычная величина необходимого сигнала не превышает 10 в. Кроме того, нужно учесть, что в микроосциллографах можно достигнуть скорости записи более 10^9 см/сек. Все это делает эти приборы незаменимыми для изучения многих быстропеременных процессов, в том числе и одиночных импульсов.

К недостаткам микроосциллографов следует отнести сложность их конструкции и технологии изготовления, громоздкость, прерывность работы при смене пленок.

§ 5. ТРУБКИ С ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Повышения чувствительности при большой широкополосности удалось достигнуть в трубках с отклоняющей системой типа бегущей волны. На рис. 8 представлена схема такой отклоняющей системы. Электронный луч распространяется вдоль оси АВ и отклоняется электрическим полем двух изогнутых параллельных проводников, по которым распространяется электромагнитная волна в направлении движения электронов. Фазовая скорость электромагнитной волны зависит только от геометрии системы и может быть сделана равной скорости движения электронов. В этом случае каждый электрон, проходящий через отклоняющее устройство, подвергается воздействию постоянного по величине и направлению отклоняющего напряжения. Таким образом, имеется возможность достигнуть значительного повышения чувствительности отклоняющей системы за счет многократного взаимодействия электронов луча с электрическим полем исследуемого процесса. Пролетное время такой системы (а следовательно, и относительная величина искажений сигнала за счет пролетного фактора) определяется временем пролета электронов сквозь одну петлю и может быть сделано достаточно малым.

Кроме того, в трубках с отклоняющей системой бегущей волны удается достигнуть хорошего согласования с источником сигналов. Эти достоинства трубок с отклоняющей системой бегущей волны делают их весьма перспективными при изучении быстропротекающих процессов.

В последние годы появились сообщения о нескольких конструкциях таких трубок. Одна из первых трубок бегущей волны²³ имела отклоняющую систему в виде двух параллельных проволочных петель (рис. 8). Конструкция трубки носила характер экспериментальной разработки. По расчету авторов трубка могла работать без заметного снижения чувствительности до 30 000 мГц. Однако при расчете не учитывались излучение, отражение в стекле, эффекты конечной длины линии, время пролета электронами одной петли и т. д. Трубка имела ускоряющий потенциал 2,5 кВ и чувствительность 0,1 мм/в. С ее помощью были произведены наблюдения фигур Лиссажу, и частотный анализ непрерывных волн Холлменовским методом инверсионных спектрограмм.

Трубка более поздней конструкции²⁴ была приспособлена для массового производства. Она предназначалась для регистрации неперiodических процессов миллимикросекундной длительности. Отклоняющая система состояла из ленточной полукруглой спирали с плоской стороной, помещенной в подобной формы экран. Электронный луч проходил между плоскими частями экрана и спирали. Благодаря тому, что спираль по всей длине находилась на постоянном расстоянии от экрана и монтировалась из ленты постоянной ширины, отклоняющая система действовала как линия с распределенной индуктивностью и емкостью. В данной трубке отклоняющая система была сконструирована на волновое сопротивление 50 ом (ширина ленты спирали 1 см; расстояние между спиралью и экраном 0,2 см). При ускоряющем напряжении 10 кВ пролетное время составляло $0,17 \cdot 10^{-9}$ сек. Чувствительность отклонения равнялась $2,5 \cdot 10^{-1}$ мм/в. Пятипроцентное уменьшение чувствительности наблюдалось при частоте 1000 мГц. С помощью пяти колец послеускорения потенциал луча повышался до 35 кВ, что позволило получить максимальную скорость записи $1,5 \cdot 10^9$ см/сек. Диаметр пятна на экране составлял 0,15 мм. В трубке использовался экран с весьма эффективным люминофором, покрытый тонким зеркальным слоем алюминия.

В Советском Союзе трубка подобной конструкции впервые была сделана в 1953 г. С. Г. Константиновым во время дипломного проектирования. В работе²⁵ дан расчет чувствительности отклоняющей системы бегущей волны и приводятся частотные характеристики трубки до частот порядка 3000 мГц.

В трубках, сконструированных А. М. Чернушенко и П. А. Тарасовым²⁶, принимались две разновидности отклоняющих систем бегущей волны со спиральной и плоской петлей. Отклоняющая система была рассчитана на характеристическое сопротивление 100 ом. Ускоряющее напряжение в этих трубках составляло 10 кВ. С помощью четырех колец послеускорения потенциал луча повышался до 35 кВ. При этом максимальная скорость записи составляла $2 \cdot 10^{10}$ см/сек. Надо отметить, что в этих трубках применяется металлизированный экран с очень эффективным

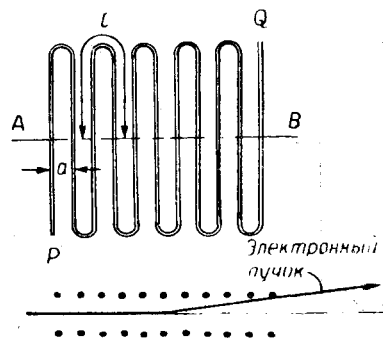


Рис. 8. Схема отклоняющей системы трубки бегущей волны.

люминофором, позволяющий при прочих равных условиях получить в четыре раза большую яркость пятна, чем на ранее применявшихся люминофорах.

Чувствительность отклонения составляет около 0,5 мм/в. Полное отклонение по оси явления составляет 2 см, а по оси времени 10 см. Для этих трубок был специально разработан прожектор, у которого прикатодная линза создает параллельный пучок электронов. В трубках использовалась электростатическая фокусировка. Диаметр пятна на экране составляет около 0,2 мм. По утверждению конструкторов трубки могут эффективно использоваться до частот порядка 10 000 мГц.

Оригинальный метод осциллографирования быстропротекающих процессов был разработан в МЭИ им. Молотова²⁷. Отклонение луча в осциллографической трубке производится с помощью двухпроводной (двухпроводной) спиральной линии, ось которой совпадает с осью трубки (рис. 9).

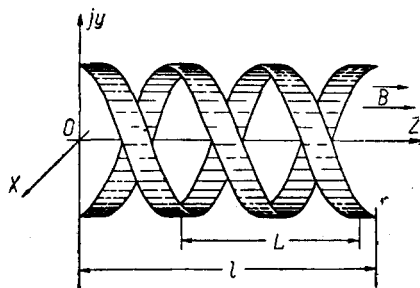


Рис. 9. Схема саморазвертывающейся отклоняющей системы.

Эта спиральная отклоняющая система питается от двухпроводного, предпочтительно симметричного фидера. Другой конец спирали может быть разомкнут или нагружен на согласованное сопротивление.

При прохождении электромагнитной волны по такой спиральной отклоняющей системе происходит поворот электрического поля. В результате этого, сила, которая действует на электроны в каждом последующем сечении отклоняющей системы, направлена под некоторым углом к направлению поперечной скорости электронов, приобретенной ими в предыдущем сечении. Скорость поворота поля относительно электронов луча обратно пропорциональна шагу спирали и зависит от скорости луча, а полный угол поворота поля определяется длиной и шагом спирали.

Такая отклоняющая система может быть помещена в продольное магнитное поле. В этом случае необходимо учитывать еще поворот вектора поперечной скорости электронов на угол, пропорциональный циклотронной частоте и времени перемещения электронов от одного сечения системы к другому.

Интересен вариант отклоняющей системы в виде двухпроводной прямой передающей линии, параллельной электронному лучу, помещенной в продольное магнитное поле. В этом случае отклоняющая система имеет большую широкополосность и меньшую дисперсию. Скорость поворота электрического поля относительно электронов луча определяется циклотронной частотой $\omega_0 = \frac{eB}{m}$ а полный угол поворота является функцией величины магнитного поля и пролетного времени.

Следует, однако, отметить, что применение магнитных катушек значительно усложняет конструкцию осциллографа. Серьезные затруднения возникают также с фокусировкой электронного луча и юстировкой магнитного поля.

Более перспективными оказались трубки, в которых отклонение электронного луча производится с помощью двухпроводной спиральной линии без применения магнитных катушек.

Характерной особенностью трубки с отклоняющей системой данного типа является то, что она, в отличие от других систем отклонения, может работать лишь при периоде изменения исследуемого процесса меньшем или равном пролетному времени, т. е. такие трубки фактически могут

использоваться только для индикации колебаний с частотой большей 100 *мгц* и импульсов короче 10 *мл мксек*. Однако при использовании малых ускоряющих напряжений возможно наблюдение более длительных процессов. Достаточная скорость записи при этом может быть обеспечена с помощью послеускорения. Большое преимущество данной трубки состоит в том, что система ее отклонения является саморазвертывающей. Таким образом отпадает необходимость в генераторе развертки. Кроме того, применение трубок с центральным коллектором, собирающим электроны не-возмущенного луча, позволяет устранить из осциллографа все вспомогательные цепи. В этом случае осциллограф состоит лишь из выпрямителей питания и трубки.

Важной особенностью этого метода является возможность доведения чувствительности отклонения от чувствительности самых низковольтных электронно-лучевых трубок с обычной отклоняющей системой.

К недостаткам метода относится сложная форма осциллограмм. Если в обычных трубках сигнал записывается в прямоугольных координатах, то в данном случае связь между величиной, характеризующей явление, и временем оказывается значительно сложнее. Например, при осциллографировании колебаний СВЧ следом луча является эллипс, а модулированные колебания получаются в виде кольца, толщина которого зависит от глубины модуляции. Таким образом, необходима расшифровка осциллограмм.

Холменом²⁹ была предложена отклоняющая система, состоящая из трех пар пластин. Причем время пролета электронов сквозь одну пару пластин подбирается так, что оно равняется половине периода синусоидальной волны. Таким образом, полное отклонение электронов равняется сумме отклонений, приобретенных ими при пролете каждой пары пластин. Однако следует отметить, что область частот, в которой может использоваться такое отклоняющее устройство, довольно мала. Поэтому применение такой системы ограничено.

Как показывают приведенные примеры, электронно-лучевые трубки с отклоняющей системой типа бегущей волны позволили расширить частотный диапазон осциллографирования вплоть до частот порядка 5—10 тысячи *мгц* при удовлетворительной чувствительности (порядка 0,2÷0,5 *мм/в*) в хорошем согласовании.

В настоящее время трубки бегущей волны становятся мощным оружием исследования быстропротекающих процессов. К недостаткам таких трубок следует отнести сложность конструкции как отклоняющей системы, так и трубки в целом, искажения сигналов из-за конечных размеров отклоняющей системы, пролетного фактора.

§ 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХКОРОТКИХ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Несколько особняком от электронно-лучевых трубок, предназначенных для индикации электромагнитных процессов, стоят трубки, предназначенные для непосредственного наблюдения очень коротких электронных сгустков. Их возникновение связано с развитием техники миллиметровых волн, ядерной физики и т. д. Дело в том, что задача получения миллиметровых волн, миллимикросекундных и более коротких импульсов заключается в основном в разработке методов получения достаточно коротких электронных сгустков большой плотности. Теоретический анализ многих вопросов этой проблемы чрезвычайно затруднен. Экспериментальное изучение электронных сгустков, включающее такие вопросы, как измерение длительности, наблюдение формы и плотности сгустков, изучение явле-

ний, связанных с пространственным зарядом и т. д., требует создания очень тонкой методики измерения.

Для измерения длительности электронных сгустков удобно использовать метод круговой развертки, позволяющий значительно увеличить шкалу времени. Такой тип развертки получается при подаче на отклоняющую систему двух, равных по частоте и амплитуде, но сдвинутых по фазе на 90° , синусоидальных напряжений. При развертке непрерывного луча на экране получается окружность; при развертке луча, нарезанного на сгустки, получается дуга окружности, длина которой пропорциональна длительности сгустка.

$$t = \frac{T}{2\pi R} l = \frac{T}{2\pi} \alpha,$$

где T — период развертывающего напряжения, l — длина дуги, α — длина дуги в радианах, $2\pi R$ — длина окружности развертки.

Для измерения сгустков длительностью 10^{-9} сек. и меньше обычно используются трубки с отклоняющей системой в виде двухпроводных ли-

ний³⁰. При использовании таких трубок с помощью круговой развертки удается измерять электронные сгустки длительностью до 10^{-11} — 10^{-12} сек.

Недостатком этого метода является невозможность наблюдения формы сгустков.

Весьма заманчивым является так называемый «метод перекрещивающихся лучей»³¹: изучение электронных сгустков большой плотности тока производится с помощью развертки

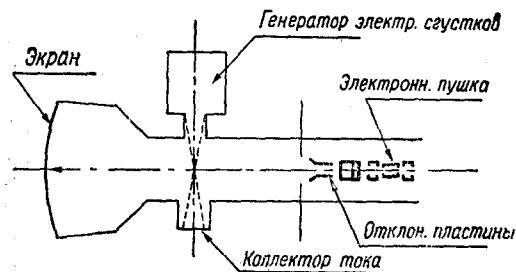


Рис. 10. Схема трубки с перекрещивающимися лучами.

поперечного пробного луча и наблюдения кулоновского расталкивания на экране трубки. На рис. 10 представлена схема трубки, с помощью которой производилась проверка этой идеи.

В условиях опыта импульсный луч имел длительность сгустков порядка 2 мксек при 8 кВ ускоряющего напряжения и силе тока 0,115 мА. Пробный луч имел потенциал 1,45 кВ. Сравнение изображений, полученных с помощью метода перекрещивающихся лучей и с помощью синхроскопа, дает хорошее совпадение.

Вертикальное отклонение составляло около 5 мм. Метод³² позволяет определять угол расталкивания.

Таким образом, метод перекрещивающихся лучей дает возможность получить значительно более полную картину исследуемых сгустков электронов, чем другие методы. Однако сомнительным является утверждение авторов этого метода, что метод перекрещивающихся лучей позволяет изучать сгустки длительностью меньше 10^{-12} сек. При столь коротких сгустках заряд их будет слишком мал для получения достаточного отклонения пробного луча. Кроме того, нельзя забывать о искажениях, связанных с временем пролета электронов пробного луча через исследуемый

Таблица 1

Измерение	Метод перекрещивающихся лучей (мксек)	На синхроскопе (мксек)
По вершине импульса	2,32	2,13
По основанию импульса	4,44	4,49

Таблица II

Параметры некоторых электронно-лучевых трубок

Тип осциллографической трубки	GEC 908 BCC	Ferranti 06/3 (при 15 кВ)	Ferranti 06/3 (при 25 кВ)	GEC 1608 BCCA	Lee's микро- осцилло- граф	Arden- ne's микро- осцилло- граф	Smith's осцилло- граф	Ferranti 06/20	ТБВ Черну- шенко- Тарасова
Ускорение (кВ)	10	15	25	3	50	30	10	25	10
Послеускорение (кВ)	—	—	—	7	—	—	25	—	25
Характерист. сопротивление откл. сист. (ом)	—	—	—	—	—	100	50	250	100
Диаметр пятна (мм)	0,2 ÷ 0,25	0,3	0,2	0,45	0,01	0,01	0,15	0,2	0,2
Полезные размеры экрана (в диам. пятна)	400	420	630	350	180	500	150	630	100
Макс. скорость записи: диаметр пятна/сек	$130 \cdot 10^9$	$120 \cdot 10^9$	$100 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^9$	$200 \cdot 10^9$	$100 \cdot 10^9$	$100 \cdot 10^9$	$200 \cdot 10^9$	$1000 \cdot 10^9$
Чувствительность отклонения: диаметр пятна/в	~ 0,3	0,1	0,09	0,5	0,1	4,55	~ 1,6	0,033	2,5

слусток. Таким образом, для окончательной оценки метода перекрепления лучей необходима дополнительная экспериментальная работа.

Заканчивая рассмотрение методов сверхскоростной осциллографии, следует отметить, что в этой области техники за последнее время достигнуты значительные успехи. С помощью новых методов удалось расширить частотный диапазон осциллографирования до частот порядка 3—5 тысяч *мгц* и даже выше. В таблице II даются основные характеристики некоторых скоростных электронно-лучевых трубок.

ОСТАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТНЫХ ТРУБОК

Как уже говорилось, развитие осциллографических трубок для записи быстрых процессов шло главным образом по линии совершенствования сигнальной отклоняющей системы. При этом основное внимание было обращено на то, чтобы возможно больше ослабить влияние эффекта времени пролета электронов в отклоняющей системе и, таким образом, поднять верхнюю границу ее частотной характеристики. В трубках с обычными отклоняющими системами в форме пластин время пролета электронов удалось уменьшить, значительно увеличив ускоряющее напряжение. Однако это привело к резкому снижению чувствительности трубок.

В основу отклоняющих систем бегущей волны была положена идея длительного взаимодействия электронного луча и отклоняющего поля. Поэтому в таких трубках вместе с улучшением частотной характеристики сохраняется достаточной и чувствительность отклонения.

Нужно отметить, что для высокоскоростных осциллографических трубок чувствительность отклонения, выраженная в *мм/в*, недостаточна для определения качества трубки. Действительно, при одинаковой чувствительности отклонения трубка, имеющая меньший диаметр пятна на экране, позволит наблюдать сигналы меньшей амплитуды. Поэтому вводится понятие относительной чувствительности, которая показывает величину отклоняющего напряжения в вольтах, необходимую для перемещения пятна на экране на расстояние, равное диаметру пятна. Чем выше относительная чувствительность отклонения, тем лучше разрешающая способность трубки и точность измерения изображения на экране трубки. Таким образом, разрешающую способность трубки можно повысить, уменьшая диаметр пятна. В современных высокоскоростных осциллографических трубках повышение разрешающей способности достигается как за счет повышения чувствительности отклонения, так и за счет уменьшения размеров пятна. Последней проблеме посвящен ряд работ^{33, 34, 36}, в которых исследуется влияние различных факторов на диаметр пятна. К наиболее существенным из них можно отнести электронно-оптические свойства прожектора, взаимное расталкивание электронов в луче, естественный разброс начальных скоростей электронов при вылете из катода. Рассмотрим теперь влияние перечисленных факторов на размеры пятна.

§ 7. ДИАМЕТР ПЯТНА

Электронный прожектор. Прожектор должен обеспечивать получение в плоскости экрана малого диаметра поперечного сечения луча при возможно большем токе луча. Типичные конструкции прожекторов с электростатической фокусировкой схематически изображены на рис. 11. На рис. 12 представлен прожектор с магнитной фокусировкой. Из приведенных рисунков видно, что прожектор является двухлинзовой си-

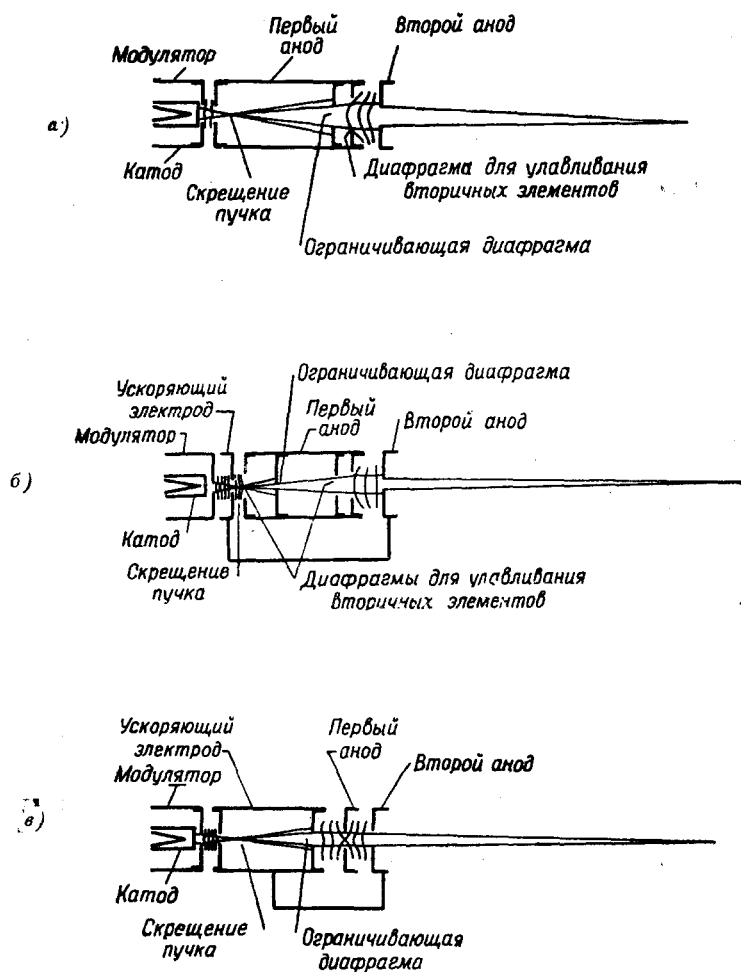


Рис. 11. Конструкции прожекторов с электростатической фокусировкой.

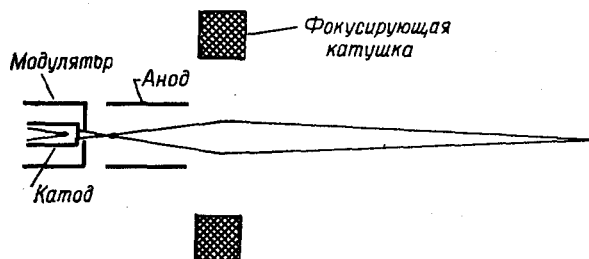


Рис. 12. Простейший прожектор с магнитной фокусировкой.

стемой. Первая, прикатодная, линза состоит из катода, модулятора и первого анода или ускоряющего электрода. Такого рода линзы в электронной оптике носят название иммерсионного объектива. Вылетающие из катода электроны собираются прикатодной линзой в сходящийся пучок (см. рис. 13). Изображение поверхности катода создается в сечении $a'-b'$,

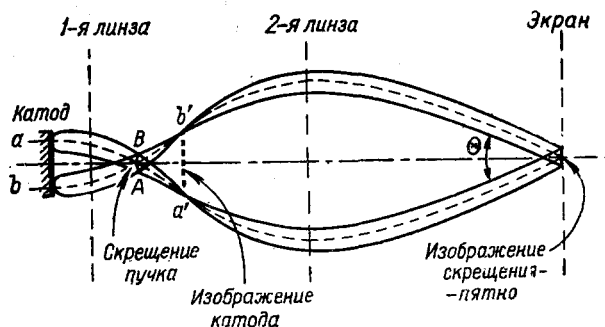


Рис. 13. Формирование пучка в электронном прожекторе.

меньший диаметр скращения пучка, чем конструкция рис. 11, а, благодаря наличию ускоряющего электрода, потенциал которого больше потенциала первого анода.

При выборе конфигурации электродов линзы следует учитывать необходимость уменьшения сферической aberrации. Экспериментально доказано, что если вторая линза образована двумя цилиндрами, то сферическая aberrация будет минимальной при равенстве диаметров цилиндров^{36, 37}.

Кроме того, найдено, что сферическая aberrация такой линзы становится ничтожно малой, если диаметры цилиндров примерно в 8 раз больше диаметра ограничивающей диафрагмы. Необходимость ограничения луча диафрагмами вызывается стремлением уменьшить расфокусировку его при отклонении. Однако введение ограничивающих диафрагм приводит к появлению вторичных электронов, которые затем ускоряются и образуют нефокусированный поток. Достигая экрана, эти электроны создают нежелательную засветку его, снижая тем самым контрастность изображения. Для улавливания вторичных электронов ставятся диафрагмы, обычно располагаемые в первом аноде (рис. 11, а и 11, б). В прожекторе, изображенном на рис. 11, в, таких диафрагм нет, так как в этом случае электронный луч ограничивается только электродами, имеющими наибольшие потенциалы (ускоряющий электрод и второй анод), и поэтому вторичные электроны, выбитые из этих электродов, возвращаются обратно на них и не могут создавать рассеянные лучи.

Магнитная фокусировка позволяет получить меньший диаметр пятна. Сферическая aberrация у такой линзы меньше, чем у электростатической, благодаря большому диаметру фокусирующей катушки, которая располагается снаружи трубки.

Взаимное расталкивание электронов в луче. Взаимное расталкивание электронов в луче ограничивает возможности увеличения плотности тока в луче и уменьшения сечения луча. Чем больше плотность тока луча, тем сильнее расталкивание и тем больше диаметр сечения луча и, следовательно, диаметр пятна. Поэтому стремление к повышению яркости свечения за счет увеличения плотности тока луча приводит к увеличению пятна. В каждом практическом случае должно быть найдено компромиссное решение.

а наименьшее сечение луча — в сечении $A-B$. Вторая линза, которая может быть как магнитной, так и электростатической, создает изображение скращения пучка на экране. Следовательно, прикатодную линзу надо конструировать таким образом, чтобы она давала минимальные размеры скращения.

Конструкции прожекторов, представленные на рис. 11, б и 11, в, имеют

Теоретический анализ этого эффекта¹ показывает, что для уменьшения диаметра пятна при учете взаимного расталкивания электронов необходимо: 1) увеличить угол схождения луча в фокусе прожектора (угол Θ на рис. 13), 2) увеличить напряжение второго анода, 3) уменьшить радиус выходного отверстия второго анода, 4) уменьшить ток луча.

В действительности две первые меры не приводят к желаемому результату. Увеличение угла схождения луча приводит к увеличению диаметра сечения луча в области фокусирующего поля второй линзы. Вследствие этого увеличивается абберация, а также и расфокусировка луча при отклонении.

При увеличении анодного напряжения, как показывают результаты экспериментов^{38, 6}, размер пятна уменьшается только до тех пор, пока напряжение не достигло некоторой, сравнительно небольшой, величины, а затем остается неизменным. Достоверного объяснения этого явления пока еще не найдено.

Уменьшение диаметра отверстия второго анода и уменьшение тока луча позволяют значительно уменьшить диаметр пятна. Отверстия делают настолько малыми, что изготовление деталей прожектора и последующая сборка требуют исключительной точности. При использовании магнитной фокусировки необходима очень точная установка фокусирующей катушки.

Таким путем Арденне М.¹⁸ еще в 1939 г. получил пятно диаметром порядка 10 μ .

Следует отметить, что при уменьшении тока луча достижимы большие плотности тока. Действительно, при уменьшении сечения луча с помощью диафрагмы уменьшается пространственный заряд в поперечном сечении луча и, следовательно, уменьшается взаимное расталкивание электронов.

Прежние силы расталкивания электронов получаются уже при большей плотности тока, следовательно, фокусировка луча после диафрагмирования увеличит плотность тока в луче. Взаимное расталкивание электронов приводит еще к тому, что наименьшее сечение луча получается не в фокусе прожектора, а несколько дальше. Это необходимо учитывать при конструировании трубки и, в частности, прожектора.

Влияние разброса начальных скоростей электронов. Электроны вылетают из катода по различным направлениям, имея максвелловское распределение скоростей.

Этот разброс начальных скоростей электронов по величине и по направлению ослабляет фокусирующее действие прожектора, понижая предельно достижимую плотность тока в луче и также препятствуя уменьшению размеров пятна.

Анализ показывает¹, что для ослабления влияния разброса начальных скоростей необходимо: 1) выбирать катод, обладающий большой плотностью тока эмиссии при возможно более низкой рабочей температуре*), 2) увеличивать потенциал области формирования пятна, 3) увеличивать угол схождения луча в пятне.

Первому требованию наиболее полно удовлетворяет оксидный катод. Удовлетворение второго требования приводит к затруднениям с отклонением луча. Относительно возможности осуществления третьего требования было уже сказано выше при разборе явления взаимного расталкивания электронов.

*) Действительно, чем ниже температура катода, тем меньше начальные скорости электронов и тем слабее будет сказываться разброс скоростей.

Кроме рассматриваемых основных факторов, на диаметр пятна влияют и такие факторы, как явление полного внутреннего отражения в стекле экрана и фокусирующее действие поля электродов послеускорения. Оба эффекта будут рассмотрены ниже.

§ 8. СКОРОСТЬ ЗАПИСИ

При осциллографировании быстропеременных процессов скорость движения луча по экрану приобретает большие значения — $10^9 \div 10^{10}$ см/сек и даже больше. С увеличением скорости движения луча падает яркость изображения, которое может оказаться настолько бледным, что его невозможно будет зарегистрировать. При исследовании повторяющихся процессов, многократно развертываемых на экране, яркость может быть достаточной, если люминофор обладает большим временем послесвечения. В этом случае яркость свечения не успевает упасть значительно за период повторения развертывающего напряжения, и происходит ее накопление за ряд периодов. Сравнение наиболее распространенных в осциллографии люминофоров¹ показывает, что для большинства из них время послесвечения лежит в пределах $10^{-2} \div 10^{-3}$ сек, что является вполне достаточным при осциллографировании быстропеременных процессов.

Исследование однократных процессов значительно труднее из-за слабой яркости свечения. Очевидно, что существует предельная скорость движения луча по экрану, при которой еще можно различить изображение. Величина этой предельной скорости зависит от способа регистрации и будет различной для визуального наблюдения и фотографирования. Поэтому для высокоскоростных осциллографических трубок вводится новый, очень важный параметр — максимальная скорость записи трубки. Под максимальной скоростью записи понимают ту наибольшую скорость движения луча по экрану, при которой на фотографии получается достаточно четкое изображение. Ясно, что данные о максимальной скорости записи будут неполными, если не указаны условия фотографирования (светосила объектива и чувствительность негативного материала).

Максимальную скорость записи можно определить при подаче на отклоняющую систему трубки гармонического колебания². На экране получится изображение, меняющееся по закону:

$$y = A \sin \omega t.$$

Скорость движения луча по экрану складывается из двух скоростей: v_t — по оси времени и v_y — по вертикали. Скорость v_t постоянна во времени, а v_y имеет наибольшее значение при нулевом отклонении луча, равно

$$v_{y(y=0)} = \dot{y}_{(y=0)} = \omega A = 2\pi f A.$$

Полная скорость движения луча по экрану равна

$$v = \sqrt{v_t^2 + v_y^2} = \sqrt{v_t^2 + (2\pi f A)^2}.$$

Подобрав частоту или амплитуду колебания, можно таким образом определить максимальную скорость записи. Здесь необходимо отметить взаимосвязь максимальной скорости записи и разрешающей способности трубки. Сравним две трубки с одинаковой максимальной скоростью записи, но различной чувствительностью отклонения при одинаковом диаметре пятна. При подаче одного и того же напряжения на отклоняющие системы этих трубок у трубки с меньшей чувствительностью скорость

движения луча по экрану будет меньше. Следовательно, яркость изображения у этой трубки будет больше и с ее помощью можно регистрировать более быстрые процессы. Однако разрешающая способность оказывается меньше, чем у второй трубки. Поэтому необходимо уменьшить диаметр пятна для того, чтобы сохранить достаточную разрешающую способность.

Из числа факторов, от которых зависит максимальная скорость записи, необходимо отметить свойства люминофора, плотность тока луча, ускоряющее напряжение, форму колбы, чувствительность фотоэмульсии и светосилу объектива.

Характеристики люминофоров подробно описаны в литературе^{39, 40, 6, 41, 42}, поэтому в настоящем обзоре представляется возможным охарактеризовать только те их свойства, которые имеют особо важное значение в работе высокоскоростных осциллографических трубок. Эти свойства люминофоров будут рассматриваться в связи с другими факторами, влияющими на яркость свечения люминофора.

§ 9. ЗАВИСИМОСТЬ ЯРКОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА И УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Наиболее сильно яркость зависит от плотности тока луча и ускоряющего напряжения.

Из эксперимента следует, что яркость свечения должна расти пропорционально увеличению плотности тока. Однако при больших плотностях тока наступает насыщение яркости, которое в основном определяется люминофором и способом его нанесения.

С другой стороны, это соотношение выполняется только до некоторого, вполне определенного значения ускоряющего напряжения, при котором наступает ограничение яркости, вызванное накоплением отрицательного заряда на люминофоре.

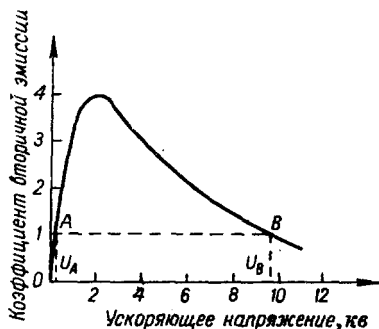


Рис. 14. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от ускоряющего напряжения.

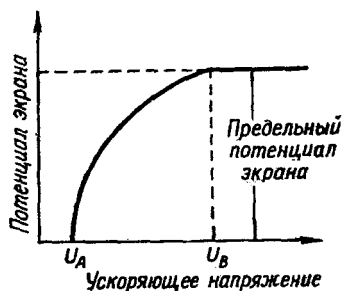


Рис. 15. Зависимость потенциала экрана от ускоряющего напряжения.

На рис. 14 представлена зависимость коэффициента вторичной эмиссии люминофора от ускоряющего напряжения. При изменении ускоряющего напряжения от U_A до U_B коэффициент вторичной эмиссии больше единицы, и экран приобретает потенциал, несколько больший потенциала анода. Для ускоряющих напряжений, больших U_B , коэффициент вторичной эмиссии меньше единицы, вследствие этого экран заряжается отрицательным зарядом, который тормозит электроны луча. Потенциал экрана теперь остается неизменным, несмотря на рост ускоряющего напряжения (рис. 15) и, следовательно, прекращается рост яркости свечения.

От этого отрицательного эффекта удастся избавиться при помощи тонкой алюминиевой пленки, наносимой на сторону люминофора, обращенную к прожектору^{39, 40, 43}. На пленку подается большой положительный потенциал, так что благодаря хорошей проводимости алюминия электроны луча легко отводятся с экрана. Эксперименты показывают, что с применением алюминиевого покрытия яркость значительно возрастает.

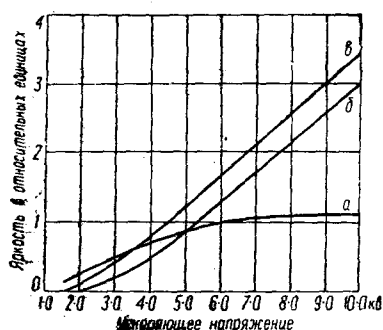


Рис. 16. Зависимость яркости свечения от ускоряющего напряжения для обычного и алюминиевого экранов. а) неалюминированный экран; б) экран, покрытый толстым слоем алюминия; в) экран, покрытый тонким слоем алюминия.

светящегося пятна, которые идут внутрь колбы. Конечно, часть отраженной световой энергии теряется в материале экрана, но все-таки яркость изображения несколько возрастает.

Таким образом, с применением металлизированного экрана можно значительно повысить яркость, увеличив ускоряющее напряжение. Однако это приводит к большой потере в чувствительности, так как уменьшается время пролета электронов в отклоняющей системе. Использование принципа послеускорения позволяет значительно повысить яркость при небольшом понижении чувствительности^{44, 45, 47, 48, 49}. В этом случае электронный луч сначала ускоряется относительно небольшим напряжением второго анода прожектора. После прохождения отклоняющей системы электроны луча послеускорения, потенциал которого значительно

наносимой на сторону люминофора, обращенную к прожектору^{39, 40, 43}. На пленку подается большой положительный потенциал, так что благодаря хорошей проводимости алюминия электроны луча легко отводятся с экрана. Эксперименты показывают, что с применением алюминиевого покрытия яркость значительно возрастает. На рис. 16⁴³ представлены зависимости яркости от ускоряющего напряжения для обычного и алюминиевого экранов. Из этих характеристик видно, что применение алюминиевого покрытия выгодно при ускоряющих напряжениях свыше 4 кВ, причем для ускоряющего напряжения в 7 кВ выигрыш в яркости получается по сравнению с обычным экраном в 2 раза.

Кроме того, алюминиевая пленка отражает в сторону наблюдателя те лучи от

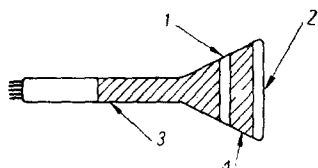


Рис. 17. Обычная форма трубки с послеускорением: 1 — кольцо изолирующего материала, 2 — экран, 3 — графитовое покрытие, соединенное со вторым анодом; 4 — кольцо послеускорения.

ускоряются электродом больше потенциала второго анода. Электрод послеускорения образзуется нанесенной на внутреннюю поверхность колбы кольцевой полосой из проводящего материала. Схематическое изображение такой трубки представлено на рис. 17. Часто используется не одно, а несколько колец послеускорения. Графитовые кольца разделены кольцами непроводящего ма-

Таблица III

	Обычная трубка при напряжении 1 в	Обычная трубка при напряжении 10 в	Трубка с послеускорением; напряжение анода 2 в. Напряжение после ускорения 10 в
Яркость	1,0	35	35
Чувствительность отклонения	1,0	10	1,4

териала. Подача напряжения на кольца послеускорения производится через стенку колбы.

Так как энергия электронов луча определяется конечным ускоряющим напряжением, то на второй анод можно подавать сравнительно небольшие напряжения, в результате чего время пролета электронов сквозь отклоняющую систему уменьшается. Следовательно, при использовании ускорения после отклонения луча не только повышается яркость, но и сохраняется чувствительность отклонения.

Как видно из таблицы III⁴⁷, трубка без послеускорения с обычным напряжением имеет при необходимой чувствительности малую яркость. Та же трубка с повышенным ускоряющим напряжением обладает в 35 раз большей яркостью, но при значительном понижении чувствительности. Достоинства этих двух трубок соединяются в трубке с послеускорением.

Необходимо отметить, что чувствительность трубки с послеускорением все же несколько ниже, чем у обычной трубки. Это объясняется собирающим действием линзы, образованной полями второго анода и электродов послеускорения. Однако снижение чувствительности еще не означает ухудшения разрешающей способности трубки. Диаметр пятна с увеличением послеускоряющего напряжения уменьшается быстрее, чем падает чувствительность, и, следовательно, относительная чувствительность повышается.

Для уменьшения искажений, вносимых полем электродов послеускорения, необходимо стремиться к тому, чтобы эквипотенциали этого поля были перпендикулярны траекториям электронов луча. Некоторое приближение к этому идеальному случаю обеспечивается использованием нескольких колец послеускорения, так как в этом случае ускоряющий потенциал вдоль траектории электронов увеличивается более плавно, чем в трубке с одним кольцом послеускорения. В результате в трубке с несколькими ступенями послеускорения отношение максимального ускоряющего напряжения к напряжению второго анода может быть доведено до 10, тогда как в трубке с одной ступенью послеускорения это отношение не превышает 3.

Таким образом, введение послеускорения позволяет значительно увеличить яркость, а значит, и максимальную скорость записи.

§ 10. КОНТРАСТНОСТЬ

Абсолютная величина яркости свечения не вполне характеризует возможности трубки, так как регистрирующий прибор может зафиксировать только такое изображение, яркость которого больше яркости остальных участков экрана. Поэтому вводится еще одна характеристика экрана — «контрастность». Под контрастностью понимается отношение яркостей самого яркого и самого темного участков экрана.

Сильно снижает контрастность присутствие внешнего освещения экрана. Уменьшение контрастности происходит также из-за явления полного внутреннего отражения в стекле экрана (рис. 18). Часть лучей от светящегося пятна отражается от границы между стеклом и воздухом, а затем после вторичного отражения создает ореол вокруг пятна и засветку остальных частей экрана. В статье⁴⁹ приводятся способы ослабления этого эффекта.

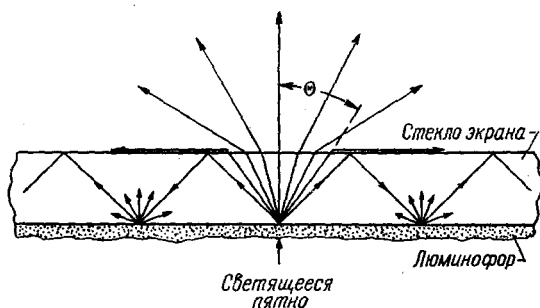


Рис. 18. Образование ореола.

Некоторое влияние на контрастность оказывает и форма колбы. Лучи от светящегося пятна, идущие внутрь трубки, могут после отражения от стенок колбы попадать на экран, засвечивая его (рис. 19, а). Поэтому колбе трубки придают специальную форму (рис. 19, б), благодаря чему лучи света возвращаются на экран только после многократного отражения. В трубках с алюминированным экраном световые лучи не проходят внутрь колбы, поэтому с этой точки зрения форма колбы несущественна.

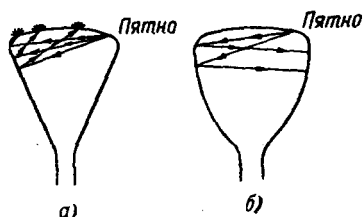


Рис. 19. Влияние формы колбы на отражение световых лучей, падающих от экрана.

§ 11. ФОТОГРАФИРОВАНИЕ

Конечным этапом большинства измерений на осциллографе является фотографирование. Фотоматериал может располагаться как снаружи трубки, так и внутри. В первом случае возбуждается люминофор, свечение которого после прохождения через стекло экрана и оптическую систему воздействует на фотоэмульсию. Однако лишь небольшая часть энергии электронов преобразуется в световую энергию. В свою очередь только малая часть световой энергии достигает фотоэмульсии. Во втором случае, при внутреннем фотографировании используется почти вся энергия электронов. Однако существенным неудобством этого метода является необходимость непрерывной откачки трубки, так как при смене фотоматериала в трубку напускается воздух.

При фотографировании с экрана необходимо совпадение спектральных областей максимальной светоотдачи люминофора и максимальной чувствительности фотоэмульсии. Люминофоры, специально предназначенные для фотографирования, дают синие, фиолетовые ($\text{ZnS} \cdot \text{Ag}$, CaWO_4), беловато-голубые ($\text{ZnS} \cdot \text{CuZn}$, ZnS чистый) цвета⁴². Большинство этих люминофоров принадлежит к сульфидам и имеет максимум излучения в синей части спектра, однако значительная часть энергии послесвечения излучается в желтой и зеленой частях спектра. Поэтому для фотографирования с таких экранов целесообразно применять ортохроматические и панхроматические эмульсии, максимум чувствительности которых лежит в желто-зеленой части спектра.

Ряд вопросов техники фотографирования освещен в работах⁵⁰⁻⁵⁵.

ВЫВОДЫ

В заключение остановимся на достигнутых результатах и перспективах развития осциллографических трубок для быстропеременных процессов.

К настоящему времени ширина полосы исследуемых частот доведена до 10 000 мГц. Трубки с такой полосой позволяют исследовать процессы длительностью порядка 10^{-9} сек.

Большинство трубок обладает хорошей разрешающей способностью. Минимальная величина сигнала, который может быть разрешен на экране трубки, имеет порядок вольт. Особняком стоит микроосциллограф, для которого эта величина составляет десятые доли вольт.

Можно считать, что максимальная скорость записи порядка 10^{10} см/сек, полученная для ряда трубок, является величиной реально осуществимой в промышленных типах трубок. При таких скоростях записи минимальное время разрешения достигает $5 \cdot 10^{-11}$ сек.

Однако частотные искажения в отклоняющей системе пока не позво-

ляют с достаточной точностью исследовать те переходные процессы, составляющие спектра которых превышают 1000 мгц. Большая доля этих искажений определяется недостаточным согласованием линии передачи сигнала и отклоняющей системы.

В настоящее время необходимы осциллографические трубки, позволяющие исследовать переходные процессы длительностью $10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-11}$ сек и амплитудой в десятки доли вольта. Следовательно, при разработке новых трубок необходимо стремиться к улучшению частотной характеристики отклонения и разрешающей способности осциллографических трубок.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Я. Муляров, Электронно-лучевые приборы, Госэнергоиздат, 1954.
2. И. С. Стекольников, Импульсная осциллография и ее применение, АН СССР, 1949.
3. И. С. Стекольников, Электронная осциллография кратковременных процессов, ГТИИ, 1952.
4. И. С. Стекольников, Электронный осциллограф, Госэнергоиздат, 1949.
5. Электронные лампы, ч. II, изд. «Советское радио».
6. Электронно-лучевые трубки и индикаторы, ч. I и II. Изд. «Советское радио», 1949—1950.
7. Л. А. Меерович, Л. Г. Зеличенко, Импульсная техника, Изд. «Советское радио», 1953.
8. А. Рустерхольц, Электронная оптика, ИЛ, 1952.
9. D. R. Hardy, The Recording of High-Speed Single Stroke Electrical Transients, Electronic Engineering, January, February (1956).
10. B. Jackson, The Recording of High-Speed Electrical Transient Phenomena. M. Sc. Thesis, Manchester University, 1953.
11. H. G. Rudenberg, Deflection Sensitivity of Parallel-Wire Lines in cathode-Ray Oscillographs, J. Appl. Phys. 16, 279 (1945).
12. R. Feinberg, R. Jackson, D. R. Hardy, Design Features in Cathode-Ray Tubes for the Recording of High-Speed Transients, Nature 172, 1056—7 (1953).
13. L. R. Bloom, H. M. von Foerster, Ultra-High Frequency Beam Analyzer, Rev Sci. Instr. 25, 649—653 (1954).
14. R. C. Hergenrother, H. G. Rudenberg, A. Direct-Reading Oscilloscope Frequenzen, Z. Tech. Phys. 18, 256, 1937.
15. D. M. Maskay, Some New Aspects of High-Speed Oscillography. Proc. Phys. Soc. 61, 235, 1948.
16. А. М. Чернушенко, Осциллограф для исследования СВЧ колебаний, «Радиотехника и электроника», том I, № 3, Изд. АН СССР, 1956.
17. M. von Ardenne, Der Elektronen Mikrooszillograph Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 54, 181 (1939).
18. M. von Ardenne, A Six-Trace Cathode-Ray Micro-Oscillograph, Wireless. Engin. 19, 231 (1942).
19. M. von Ardenne, Ein Präzisions-Elektronenstrahloszillograph mit Mengen u. Schreibfleckdurchmesser Nachrichtentechnik 5, 481—492 (1955).
20. G. M. Lee, A Three-Beam Oscillograph for Recording of Frequencies up to 10 000 Megacycles, Proc. Inst. Radio Engrs. 34, 121 (1946).
21. J. Fert, J. Lagasse, J. Olle, Sur la Realisation d'un oscillographe cathodique à plusieurs faisceaux, C. R. Acad. Sci. Paris 59, 238 (1954).
22. J. R. Pierce, Travelling Wave Oscilloscope, Electronics 22, 197 (1949).
23. R. Owaki, S. Terahata, T. Hada, T. Nakamura, The Travelling Wave Cathode-Ray Tube, Proc. Inst. Radio Engrs. 38, 1172 (1950).
24. S. T. Smith, R. V. Talbot, C. H. Smith, Cathode-Ray Tube for Recording High-Speed Transients, Proc. Inst. Radio Engrs. 40, 297 (1952).
25. С. Г. Константинов. Дипломный проект. Руководители Г. М. Топчиев и Ю. М. Шамаев. МЭИ имени Молотова, 1953.
26. А. М. Чернушенко, Сообщение в ИРЭ АН СССР. Радиосовет АН СССР.
27. Ю. М. Шамаев. Новые методы осциллографирования сверхбыстропротекающих процессов. В помощь промышленности. Сборник аннотаций научно-исследовательских работ, вып. 5. Изд. МЭИ имени Молотова. 1952.
28. Ю. М. Шамаев, Диссертация, МЭИ имени Молотова. 1952.

29. H. E. Hollman, The Travelling Wave Cathode-Ray Tube, Proc. Inst. Radio Engrs. **19**, 194 (1951).
30. E. W. Ernst, H. von Foerster, Electron Bunches of Short Time Duration. J. Appl. Phys. **25**, 674—675 (1954).
31. Paul D. Coleman, M. D. Sirkis, Crossed Electron Beam Technique for Displaying Short Pulses. J. Appl. Phys. **24** 952 (1953).
32. Paul D. Coleman, D. Murray, D. Sirkis, Irving Kaufman, Crossed Electron Beam Technique for Measuring Space—Charge Effects in Beams. J. Appl. Phys. **25**, 679 (1954).
33. D. B. Langmuir, Theoretical Limitations of Cathode-Ray Tubes, Proc. Inst. Radio Engrs. **25**, 977 (1937).
34. H. Moss, The Electron Gun of the Cathode-Ray Tube, Part I, Journ. of the Brit JRE **5**, 10 (1945).
35. J. R. Pierce, Theory and Design of Electron Beams. New York, 1949.
36. J. G. Maloff and D. W. Epstein, Electron Optics in Television. Mc Grow-Hill Book Company, 1938.
37. E. Gundert, Der Öffnungsfehler von elektrostatischen Rohreinsen, Zeits. Phys. **112**, 689 (1939).
38. J. A. D. Lewis, F. H. Wells, Millimicroseconde Pulse Technique N Y ÷ L, 1954.
39. А. В. Москвин, Катодолуминесценция, ч. I, Гостехиздат, 1948.
40. G. F. J. Garlick, Cathodoluminescence, Advances in Electronics **2**, 151—184. Academic Press Ins. Publishers, New York, 1950.
41. G. F. J. Garlick, The Physics of Cathode-Ray Tube Screens Electronic Engineering. **287**, August, 1949.
42. Н. Ф. Жиров, Люминофоры. Гос. изд. оборонной пром., 1940.
43. R. W. Dudding, Aluminium Backed Screens for Cathode-Ray Tubes. Journ. of the Brit. JRE **11**, 455—462 (1951).
44. E. Schwartz, Am Stande des Nachbeschleunigungsprobleme bei Kathodenstrahlröhren Fernsech. A. G., t. I, стр. 19, 1938.
45. J. A. Gier, A Cathode-Ray Tube with Post-Acceleration, Philips Techn. Rev. № 9, 245—252 (1940).
46. J. R. Pierce, After-Acceleration and Deflexion, Proc. Inst. Radio Engrs. **29**, 28 (1941).
47. W. G. White, Cathode-Ray Tube with Post-Deflexion Acceleration, Electronic Engineering **21**, 75 (1949).
48. L. S. Allard, An «Ideal» Post Deflexion Accelerator C. R. T. Electronic Engineering **22**, 461 (1950).
49. A. E. Martin and R. M. Bowie, Picture-Tube Contrast Improvement, Electronics **110**, August, 1950.
50. R. G. Hopkinson, The Photography of Cathode-Ray Tube Traces. Journ. Inst of Electrical Engrs. **93**, Pt3A, стр. 808 (1946).
51. R. J. Hercock, R. G. Hopkinson, W. F. Berg, W. Nethercot, The Photographic Recording Cathode-Ray Tube Screen Traces, Photogr. Journ. **86B**, 138 (1946).
52. R. J. Hercock, The Choice of Emulsions and Developers, Photogr. Journ., **86B**, 138 (1946).
53. R. J. Hercock, The Recording of Cathode Ray Tube Traces. Ilford Ltd, стр. 11, 1947.
54. W. F. Berg, Photographic Aspects of High-Speed Recording Photogr. Journ. **86B**, 154, 1946.
55. G. S. Moore, The Last Ounce of Speed, Photogr. Journ. **88A**, 239 (1948).