

## КРИВЫЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК

М. Т. Грехова и Р. П. Васильев

Получены кривые детектирования электронно-лучевых трубок и исследованы параметры трубок, от которых зависит форма этих кривых.

Модуляция скорости электронного луча была впервые рассмотрена Брюке и Рекнагелем [1]. Они показали, что в результате действия на электронный луч переменного поля в некотором ограниченном пространстве (модулирующее пространство) электрон получает дополнительную скорость, величина которой зависит от фазы напряжения в момент прохождения электроном модулирующего пространства (время пробега электрона через модулирующее пространство считается много меньше периода переменного напряжения). После выхода из модулирующего пространства электроны таким образом имеют разную скорость и образуют, пройдя некоторый путь, уплотнения, отделенные друг от друга местами с небольшой плотностью заряда. Модуляция скорости приводит к модуляции плотности потока. Изменение скорости, полученное в модулирующем пространстве, может быть очень невелико. Несмотря на небольшую глубину модуляции скорости, через достаточное время (после достаточно длительного „дрейфа“) в луче образуются резко обозначенные уплотнения, т. е. глубокая модуляция по плотности. Описанный процесс Брюкке и Рекнагель назвали „фазовой фокусировкой“ луча.

Луч, модулированный по плотности, может быть использован для возбуждения колебаний в надлежаще расположенном контуре. Это было сделано с одной стороны в Станфордском университете [2] (братья Варианы, Вебстер, Ганзен), где был разработан мощный генератор дцв, названный авторами „клизтроном“ и уже примененный на практике. С другой стороны Ган и Меткальф [3] (лаборатория General Electric Co.) разработали трубки с хорошо сфокусированным лучом, примененные ими для генерации, усиления и детектирования в области дцв (до 13 см; авторы указывают на возможность применения их трубок вплоть до волн в 5 см). Ган и Меткальф ввели термин „модуляция скорости“, которым мы уже выше пользовались.

Модуляция электронного луча имеет место и в мощном усилителе дцв, разработанном Гаевым [4] (Haeff, лаб. R. C. A.)<sup>1</sup>

Во всех этих приборах более или менее сфокусированный луч проходит через модулирующее пространство, в котором существует переменное поле высокой частоты. Форма электродов, на которые подается модулирующее напряжение [например напряжение сигнала в детекторной или усилительной трубке, напряжение, снятое с помощью обратной связи с колебательного контура (румбатрона) в клизтроне и т. д.], имеет существенное значение. Бр. Варианы применяли две параллельные сетки с вырезами в виде сотовых ячеек; Ган и Меткальф — особого рода „двойные сетки“, время пробега внутри которых подбиралось определенным образом. Целью настоящей работы было исследование различных форм модулирующих электродов (сеток по терминологии Гана и Меткальфа).

Представим себе следующее устройство (рис. 1).

Катод *K* излучает электроны, которые образуют более или менее сфокусированный луч, идущий вдоль оси. Фокусирующие электроды на чертеже не

<sup>1</sup> Есть сведения об аналогичных работах, ведущихся в лабораториях фирмы Telefunken (см. Jobst Telef. Haus, VI, 20, 1939). К сожалению, нам не удалось достать этой статьи.

показаны; известное влияние на фокусировку имеют, конечно, и напряжения на остальных электродах, в том числе и на модулирующем электроде.  $A$  — анод, на который подано постоянное напряжение  $V_a$ . Модулирующее пространство, в котором существует переменное поле высокой частоты, заключено между пунктирными линиями  $C$ . Модулирующие электроды будем называть сеткой. Конструкцию сетки мы пока не рассматриваем; будем считать, что она обладает известной проницаемостью для электронного луча. На сетку подано постоянное напряжение  $V_c$ . При подаче на сетку переменного напряжения электроны,

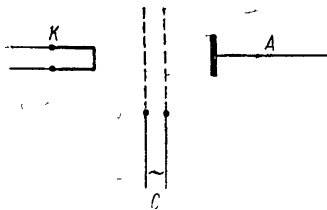


Рис. 1.

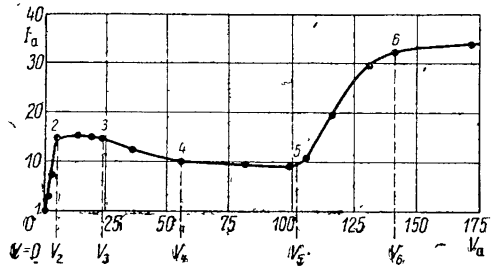


Рис. 2.

проходящие модулирующее пространство, будут получать дополнительную скорость. В результате анодный ток  $I_a$  изменится подобно тому, как если бы появилось переменное напряжение между сеткой и анодом, т. е. трубка способна детектировать. Изменение анодного тока будет зависеть, во-первых, от вида статической характеристики и выбора рабочей точки на ней и, во-вторых, от конструкции сетки. На рис. 2 показана статическая характеристика  $I_a = f(V_a)$  для одной из наших трубок. Падающий участок после точки 3 указывает на появление вторичных электронов с анода (точки перегиба являются для детектирования наиболее удобными точками).

Для каждой точки статической характеристики можно построить кривую зависимости изменения анодного тока от напряжения  $V_c$ ,  $I_{a.m} = f(V_c)$ . Ее можно назвать основной кривой детектирования трубки. На рис. 3 показаны типичные кривые для точек 1 и 2 статической характеристики вместе с отрезком статической характеристики (кривая 1). Кривая 2 дает зависимость  $I_{a.m} = f(V_c)$  для  $V_a = 0$ ; так как при  $V_c = 0$ ,  $I_a = 0$ , то эта кривая и есть основная кривая детектирования. Кривая 3 дает зависимость  $I_{a.m} = f(V_c)$  для точки 2. Постоянное значение  $I_{a.2}$  анодного тока здесь равно ординате точки 2 на статической характеристике. Вычитая из постоянного значения  $I_{a.2}$  ординаты кривой 3, получим основную кривую детектирования для точки 2. Обозначим значение анодного тока для горизонтального участка кривой 1 через  $I_{a.1}$ , а значение тока для горизонтального участка кривой 2 через  $I_{a.m}$ .

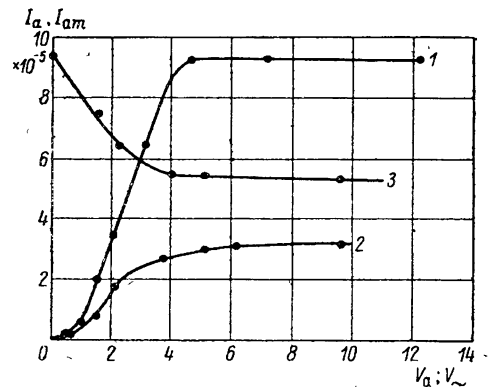


Рис. 3.

Среди электронов, получивших увеличение скорости в сетке за время положительного полупериода, повидимому, всегда есть некоторое число получивших очень малый прирост скорости. Мы высказываем предположение, что эти электроны не смогут преодолеть поля даже малого пространственного заряда у анода; следовательно,  $I_{a.m}$  будет меньше, чем  $I_{a.1}/2$ . Можно ввести коэффициент  $m_2 = I_{a.m}/I_{a.1}$ ,

характеризующий модулирующую способность сетки. Назовем  $m_i$  коэффициентом модуляции тока. Наивысшее значение  $m_i$  равно половине. Был испытан ряд конструкций сеток. Некоторые из них приведены на рис. 4. На рис. 4 (1, 2) изображены простые сетки, или, как мы их называем, аперийодические, в которых электрон лишь один раз подвергается действию переменного поля, и через которые электроны проходят за небольшую долю периода. На рис. 4 (3, 4, 5) изображены двойные сетки, в которых электрон дважды получает прирост скорости.

Сетка такого типа применялась Ганом и Меткальфом. В двойных сетках следует подобрать постоянное напряжение сетки  $V_0$  так, чтобы время пролета в сетке было равно  $(2n+1)T/2$ . Электроды сетки, изображенной на рис. 4 (б), можем соединить двумя различными способами. Для соединения рис. 5 (а) время пробега должно быть  $(2n+1)T/2$ ; для соединения, изображенного на рис. 5 (б), время пробега равно  $2nT/2$ . Двойные сетки на рис. 4 (3, 4, 5, б) можно назвать „настраивающимися“ или „периодическими“.

В табл. 1 даны величины  $m_i$  для шести типов сеток. Для данной конструкции сетки  $m_i$  постоянно. Пространственный заряд при положительном  $V_0$  не могут преодолеть только те электроны, которые имеют ничтожный прирост скорости. Этих электронов, однако, не так мало, как можно было бы ожидать, исходя из синусоидальной формы напряжения на сетке. Повидимому, дело в том, что амплитуда этого напряжения имеет в некоторых сетках очень сильную

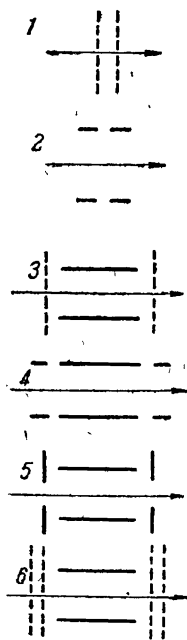


Рис. 4. Стрелкой отмечено направление электронного луча.

Таблица 1

№	$m_i$	$m_v$	Тип сетки
1 . . .	0.40	0.6	Аперийодич.
2 . . .	0.10	0.5	
3 . . .	0.35	1.6	Периодич. (двойная)
4 . . .	0.30	1.3	
5 . . .	0.38	1.7	
6 . . .	0.42	4.4	

радиальную зависимость: например для сеток типа кольца [рис. 4 (2)] амплитуда напряжения на оси очень мала. Для них получается  $m_i \ll 0.1$ .

Для измерения  $m_i$  мы применяли частоту  $10^8$  Hz. Высокая частота необходима для измерений, так как явление модуляции скорости не должно наблюдаться при низких частотах.<sup>2</sup> Следует принимать все меры предосторожности, чтобы модулирующее переменное напряжение подавалось только на сетку. Появление переменного напряжения на других электродах может совершенно исказить результат. Обратный луч не должен попадать в модулирующее пространство при измерении  $m_i$ , так как он смодулирован по плотности и будет наводить на сетке переменное напряжение. Эта „автомодаляция“ луча может привести к самовозбуждению или к увеличению напряжений, модулирующих луч на неподдающуюся точному учету величину. Устранение обратного луча может быть достигнуто надле-

<sup>2</sup> Все значения  $m_i$  и  $m_v$ , приведенные в табл. 1, были получены на волне 2.8 м. Измерения показали, что эффект детектирования ничтожно мал для волн длиннее 7 м. При укорочении волны он растет, достигая, повидимому, постоянного предельного значения при  $\lambda = 3-4$  м. Однако этот вывод нам не удалось проверить в достаточно широком интервале частот за неизменением подходящего вольтметра. Наши утверждения, что  $m_i$  и  $m_v$  суть постоянные, характеризующие конструкцию сетки, надо понимать с этой оговоркой. Предельная частота, при которой эффект детектирования достигает постоянства, зависит от конструкции сетки.

жащей формой и положением анода. Наибольшая дополнительная скорость в направлении оси, полученная электронами в сетке, дает глубину модуляции луча по скорости. Поддерживая на сетке напряжение с постоянной амплитудой  $V_{\sim}$ , будем компенсировать получившееся изменение анодного тока, изменяя анодное напряжение. Например, начав с  $V_a = 0$ , будем подавать отрицательное напряжение на анод до тех пор, пока не получим при  $V_{a_0} = V_{k_0}$ ,  $I_{a_0} = 0$ . Отношение  $V_{k_0}/V_{\sim} = m_v$  назовем „коэффициентом модуляции скорости“ („velocity coefficient“ по терминологии Гана и Меткальфа). Измерение  $m_v$  вообще удастся выполнить менее точно, чем  $m_i$ . Если измерить  $V_{k_0}$  при  $V_a = 0$ , то измерение можно провести достаточно легко; но есть основание ожидать, что при этом пространственный заряд вносит не поддающуюся расчету ошибку. Чтобы уменьшить ее, следует измерять  $m_v$  при возможно меньшем эмиссионном токе. Ошибку также вносит и обратный луч. Для измерения  $m_v$  в точке, где  $V_a \neq 0$ , нужно учитывать ход характеристики вблизи рабочей точки в пределах  $\pm V_{\sim}$ . Достаточно точно определяется  $m_v$  в точке 2 (рис. 2), если за этой точкой лежит горизонтальный участок. В случае заметного на-

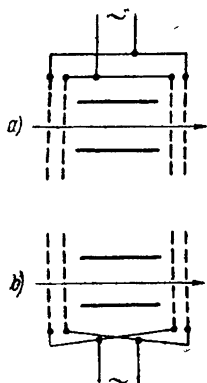


Рис. 5. Стрелкой отмечено направление электронного луча.

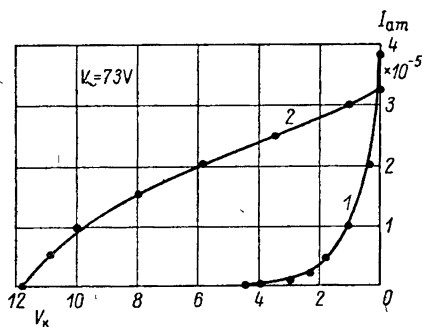


Рис. 6.

клона приходится при компенсации приводить  $I_{a_0}$  не к прежнему значению, а к несколько большему или меньшему в зависимости от нового положения рабочей точки, которая сдвигается при компенсации. Эти измерения трудно выполнить с большой точностью.

Коэффициент модуляции скорости  $m_v$  в первом приближении постоянная величина для данной конструкции сетки. Для простых сеток и для настраиваемых сеток с правильно подобранным временем пробега внутри сетки (тогда  $m_v$  имеет максимальное значение) он зависит от частоты только из-за конечной величины времени пробега через модулирующее пространство (для настраиваемых сеток это не все время пребывания электрона внутри сетки, а только время его прохождения через оба промежутка, где имеется переменное поле). На практике в наших измерениях это время пробега составляло небольшую долю периода, и зависимость  $m_v$  от частоты мала. В настраиваемой сетке  $m_v$  должен зависеть от частоты и иметь максимум при соблюдении условия: время пробега  $\tau = (2n + 1) T/2$ .

На рис. 6 даны две характерные кривые [1 — для простой сетки рис. 4 (1) и 2 — для „настраиваемой“ сетки рис. 4 (3)]. Во втором случае гораздо большее число электронов имеет скорость, близкую к максимальной; в первом случае, наоборот, много электронов приобретает только небольшую дополнительную скорость. Для сравнения вычислим отношение компенсирующего напряжения  $V'_{k_0}$ , при котором  $I_{a_m}$  уменьшается наполовину, к компенсирующему напряжению  $V_{k_0}$ , при котором  $I_{a_m} = 0$  для обеих кривых. Для

кривой 1 оно равно 0.09, для кривой 2—0.6. Автомодаляция (вследствие наличия обратного луча), вносящая ошибку при измерении (при  $V_{a.} = 0$ ) коэффициента  $m_i$ , вносит ошибку и при измерении коэффициента  $m_o$ . На рис. 7 показаны три кривых  $I_{a.m} = f(V_{\kappa})$ . Кривая 3 снята для такого случая, когда обратный луч полностью проходит через модулирующее пространство. Кривая 1 снята для тех же режимов, но обратный луч в этом случае не попадает в модулирующее пространство. Кривая 2 снята для некоторого промежуточного положения, когда луч частично попадает в модулирующее пространство. Коэффициент  $m_o$  увеличивается при полном про-

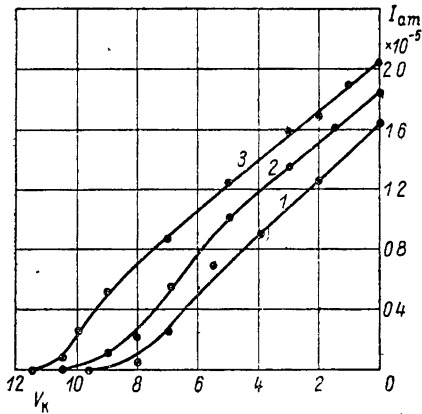


Рис. 7.

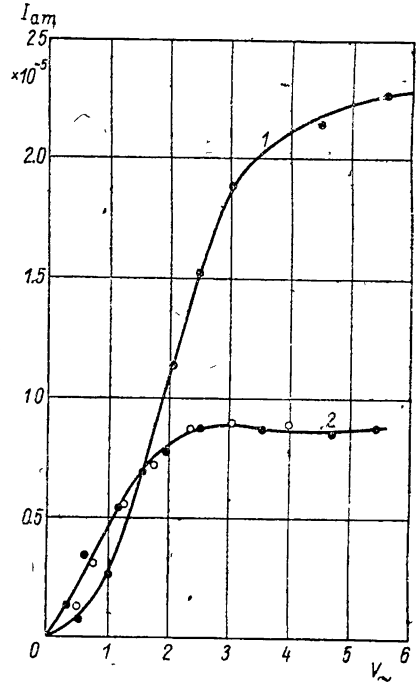


Рис. 8.

хождении обратного луча. Это происходит в том случае, когда фазы выходящего из модулирующего пространства луча и луча обратного противоположны. Ясно, что, изменив скорость (или длину пути) прямого и обратного луча, можно иметь не увеличение, а уменьшение  $m_o$  в том случае, если фазы обоих лучей будут одинаковы.

Параметры  $m_i$  и  $m_o$  вместе с кривой спада  $I_{a.m}$  (рис. 6) достаточно характеризуют работу трубки в качестве детектора. Они определяются конструкцией сетки. Таков результат наших исследований. Надо, однако, иметь в виду, что пока этот вывод проверен только на единичных экземплярах трубок.

В качестве иллюстрации утверждения, что коэффициенты  $m_i$  и  $m_o$  характеризуют работу трубки как детектора, покажем, как построить основную кривую детектирования по статической характеристике и коэффициентам  $m_i$  и  $m_o$ . Взяв какую-нибудь точку  $I_{a.1}$ ,  $V_{a.1}$  на статической характеристике, перейдем от анодного напряжения  $V_{a.1}$  к эквивалентному ему переменному напряжению на сетке  $V_{\sim 1}$  по формуле:  $V_{\sim 1} = \frac{V_{a.1}}{m_o}$ . Значение выпрямленного тока для этого напряжения сигнала будет  $I_{a.m1} = m_i I_{a.}$ . На рис. 8 показаны статическая характеристика и вычисленное по ней, указанным путем значение выпрямленного тока (кружки). Они удовлетворительно ложатся на экспериментальную основную кривую детектирования 2.

Основные кривые детектирования нескольких трубок приведены на рис. 9. Наибольшую крутизну и наибольший прямолинейный участок имеют характеристики трубок, для которых  $m_v$  и  $m_i$  имеют максимальное значение. Кривая 1 — основная кривая детектирования для лампы с модулирующими электродами типа 2; кривая 2 для лампы с модулирующими электродами типа 1, кривая 3 для лампы с модулирующими электродами типа 3 и кривая 4 для лампы с модулирующими электродами типа 5. Последние две кривые лежат близко друг к другу, и трубки, для которых они сняты, имеют параметры  $m_i$  и  $m_v$  близкие.

Этот результат показывает превосходство настраивающихся сеток над простыми, во всяком случае, для детекторных трубок.

В заключение отметим, что трубки с простыми сетками не обязательно делать лучевого типа с длинным лучом.

#### Литература.

[1] Brüche und Recknagel. ZS. f. Phys., **108**, 459—482, 1938. — [2] J. of Appl. Phys., Nos. 2, 3, 5, 7, 1939; No. 9, 1938; Electronics, Nov. 1939. — [3] W. C. Hahn and G. F. Metcalf. PIRE, **27**, 105—116, 1939. — [4] A. V. Haeff. Electronics, Febr. 1939.

Горький.  
Физико-технический институт.

Поступило в Редакцию  
5 февраля 1940 г.

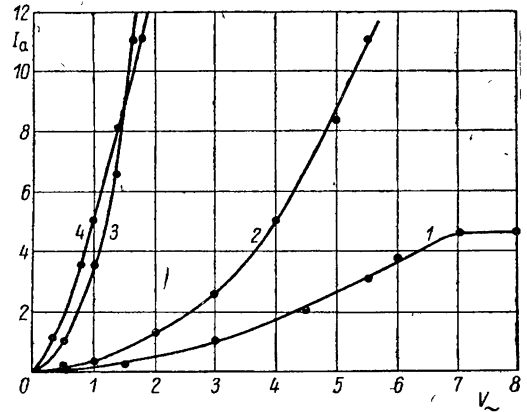


Рис. 9.