

С. 77

# И Н С Т И Т У Т ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

И Я Ф 27 - 72

Т.П.Стародубцева, Е.А.Пирушкин

## СПИРАЛЬНАЯ РАЗВЕРТКА ИОННОГО ЛУЧА БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
физики СО АН ССР  
Книг. №. 1234

Новосибирск

1972

+



Рассматривается спиральная развёртка ионного луча для обработки поверхности /в частности, поверхности полупроводниковых пластин при ионном легировании/. Выведен закон, которому должна удовлетворять огибающая синусоидального напряжения для обеспечения равномерности дозы. Рассматривается программное устройство для создания этой огибающей; приведена функциональная схема системы спиральной развёртки, дающая возможность проводить сканирование с автоматическим обеспечением необходимой дозы.



В настоящее время потоки ионов высокой энергии стали широко применяться в различных областях физики и техники. Такие потоки в ускорителях получаются, как правило, в виде лучей с малой площадью поперечного сечения и в практике зачастую возникает задача равномерного рассеивания их по всей обрабатываемой поверхности, площадь которой значительно превышает площадь поперечного сечения ионного луча. Такая задача возникает, например, при легировании полупроводниковых материалов с целью получения р-п-переходов [1,2,3], при изготовлении поверхностей со специальными механическими свойствами, при улучшении свойств сверхпроводников, при обработке полупроводников с целью улучшения сцепления между напыленной пленкой и подложкой, при ионной обработке оптических линз с целью улучшения их свойств [4]. Метод сильной дефокусировки ионного луча не обеспечивает равномерности плотности ионов, падающих на обрабатываемую поверхность, с этой точки зрения сканирование хорошо сфокусированного луча по этой поверхности оказывается более приемлемым.

Известно, что при плоско-параллельных отклоняющих пластинах для получения линейного отклонения луча на расстояние  $D$  между пластинами необходимо приложить напряжение

$$U_{пл.} = 2 \frac{D \cdot d}{e \cdot L} \cdot U_{уск.} \quad (I) \quad , \text{ где:}$$

$U_{уск.}$  — полное ускоряющее напряжение ускорителя ионов;  
 $e$  — длина отклоняющих пластин;  
 $d$  — расстояние между пластинами;  
 $L$  — расстояние от центра пластин до обрабатываемой поверхности.

Из формулы (I) следует, что при ускоряющем напряжении в несколько сотен киловольт и приемлемых геометрических размерах отклоняющей системы величина отклоняющего напряжения между пластинами может достигать 10 и более киловольт.

Сканирование можно осуществлять, в частности,

путем подачи на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины линейно нарастающих напряжений, в результате чего получается прямоугольный растр. Равномерность дозы обеспечивается в этом случае линейностью отклоняющих напряжений, но электронная аппаратура для формирования таких напряжений (порядка 10 кв и выше) получается сложной.

Известно, что при подаче на вертикально- и горизонтально-отклоняющие пластины синусоидальных напряжений постоянной амплитуды, сдвинутых по фазе на угол  $90^\circ$ , можно при определенных соотношениях амплитуд этих напряжений получить траекторию луча в виде окружности. Если теперь одновременно уменьшать амплитуду этих синусоидальных напряжений до нуля, а затем увеличивать до первоначальных значений, то получим сначала спираль, сворачивающуюся в точку, а затем — разворачивающуюся из точки. При конечном размере ионного пятна и достаточно медленном изменении амплитуд, по сравнению с частотой синусоидального напряжения, получается сплошной круглый растр. Поверхностная плотность облучения  $\sigma$  пропорциональна количеству заряда, набрасываемого на обрабатываемую поверхность ионным лучом:

$\sigma = \frac{dq}{dS}$ , где  $dq$  — заряд, а  $dS$  — элемент площади, на которую этот заряд попадает. Из условия  $\sigma = const$  легко получается следующее дифференциальное уравнение:

$$j \cdot dt = 2\pi k_1^2 \sigma \cdot U_m \cdot dU_m \quad (2), \text{ здесь}$$

$j$  — ток ионов;  $k_1$  — коэффициент пропорциональности между радиусом луча и величиной  $U_m$  отклоняющего напряжения.

Интегрируя уравнение (2), получим:

$$U_m = \sqrt{U_{m0}^2 + k_1 t} \quad (3), \text{ где:}$$

$U_{m0}$  — амплитуда синусоидального напряжения на пластинах в момент  $t = 0$ ;  $k_1$  — коэффициент, характеризующий скорость возрастания (если  $k_1 > 0$ ), или скорость убывания (если  $k_1 < 0$ ) амплитуды синусоидального напряжения на пластинах.



Из уравнения (3) видно, что для равномерного облучения обрабатываемой поверхности ионами необходимо, чтобы амплитуда синусоидальных напряжений на вертикально- и горизонтально-отклоняющих пластинах одновременно изменялись во времени по параболическому закону.

В описываемом устройстве до начала сканирования на отклоняющие пластины подается синусоидальное напряжение с неизменной во времени амплитудой  $U_{m0}$ , в результате чего ионный луч вращается по окружности большего радиуса, чем обрабатываемая поверхность (рис. 1а), что даёт возможность исключить неконтрольное попадание ионов на образец. Сканирование осуществляется отдельным циклом. Во время каждого цикла амплитуды синусоидальных напряжений сначала одновременно уменьшаются по параболическому закону от  $U_{m0}$  до 0, а затем увеличиваются по тому же закону от 0 до  $U_{m0}$ . Форма сканирующего напряжения на одной из пар пластин за время одного цикла показана на рис. 1б. Требуемую дозу можно обеспечить, задавая число циклов сканирования.

В рассматриваемом способе сканирования наиболее сложной задачей является получение нужного закона изменения во времени амплитуды отклоняющего напряжения. Поскольку готовые промышленные функциональные устройства, реализующие указанную функцию, отсутствуют, то имеет смысл аппроксимировать её ломаной кусочно-линейной функцией, которую можно легко получить с помощью программного устройства, упрощенная модель которого представлена на рис. 2. Принципиально программное устройство представляет собой функциональный жидкостный потенциометр. Конструктивно он выполнен в виде канавки в изолирующем материале, вдоль которой вмонтированы электроды Э, расположенные на определенном расстоянии ( $a, b, c, d \dots$ ) друг от друга. Канавка может быть заполнена обычной водопроводной водой, электропроводной за счёт растворенных в ней солей. Если электроды подключить к различным выводам вторичной обмотки трансформатора  $Tr1$ , то, подбирая

эти напряжения, можно получить распределение потенциала по любому закону, в том числе и по изображенному на рис. 2б, т.к. ломаная линия на рис. 2б может воспроизводить закон  $U_m \approx \sqrt{t}$  с заданной точностью, если подобрать необходимое число электродов, расстояние между ними и величины напряжений  $U_1, U_2 \dots$

$U_{n-1} \dots U_n$ , где  $n$  - число электродов.

Если теперь датчик Д двигать по поверхности воды вдоль канавки с постоянной скоростью  $v$ , не касаясь электродов Э, то амплитуда переменного напряжения, снимаемого с зажимов 1 и 2 /рис. 2а/ будет изменяться во времени как  $\sqrt{t}$ , т.е. будет подчиняться закону, выражаемому формулой (3).

Полная схема одного из возможных вариантов рассматриваемой системы сканирования приведена на рис. 3. Для удобства программное устройство П2 выполнено в виде кольцевой канавки К с электродами Э, которые подключены к выводам вторичной обмотки трансформатора  $Tr1$ . Вдоль канавки, заполненной водой, касаясь её поверхности, движется датчик Д, приводимый во вращение синхронным микродвигателем М. На одной оси с датчиком Д жестко закреплён кулачок КЛ, который через микропереключатель МП-2 выдает командные импульсы на счётно-импульсное реле П1, осуществляющее отсчёт запрограммированного числа циклов сканирования.

Расстояние между электродами Э вдоль канавки К программного устройства, а также величины напряжений, подаваемые на них с трансформатора  $Tr2$ , при равномерном вращении датчика Д обеспечивают получение между корпусом и датчиком формы переменного напряжения, соответствующей рис. 1. Это напряжение, усиленное двумя катодными повторителями, выполненными на лампах Л1 и Л2, со вторичной обмотки выходного трансформатора  $Tr2$  поступает через фазосдвигающие цепочки С1, R4 и С2, R5 на вертикально-отклоняющие пластины В блока сканирования П3, а через фазовращающую цепочку R6, R7, С3 - на горизонтально-отклоняющие пластины Г. Необходимое соотношение амплитуд на обоих парах пластин устанавливается с помощью переменных резисторов R4 и R5.



Реле P1, P2, P3 и счётно-импульсное реле П1 предназначены для автоматического обеспечения необходимой дозы на обрабатываемой поверхности, задаваемой определённым числом циклов сканирования.

До начала сканирования обмотки реле P1 и P2 обесточены; реле P3 сработало, его нормально-открытый контакт З1 блокирует нормально-замкнутый контакт кнопки КП1, а нормально-открытый контакт З2 подготавливает реле P1 к работе. Через нормально-замкнутый контакт З4 реле P2 наибольшее напряжение синусоидальной формы с неизменной во времени амплитудой поступает всё время на входной катодный повторитель через согласующий резистор R1. Поэтому ионный луч ИЛ вращается по обрабатываемой детали ОД (блок сканирования П3) по наибольшей окружности (сканирование отсутствует). Нормально-открытый контакт З1 реле P2 исключает ведение отсчёта счётно-импульсным реле П1 при замыкании контакта МП2-1 микропереключателя МП-2. Перед началом сканирования по шкале счётно-импульсного реле устанавливают необходимое число циклов сканирования луча. Для запуска сканирования нажимают кнопку КП-1, после чего в момент времени, соответствующий  $t_0$  (рис. 1), кулачок КЛ замыкает контакт МП1-1 микропереключателя МП-1, что приводит к срабатыванию реле P2, которое своим нормально-открытым контактом З2 блокирует контакт П1, нормально-открытым контактом З1 подготавливает счётно-импульсное реле П1 к производству отсчётов, нормально-замкнутым контактом З3 отключает реле P3, нормально-замкнутым контактом З4 отключает вход первого катодного повторителя от вторичной обмотки трансформатора Tr1. Теперь на входной катодный повторитель через согласующий резистор R2 поступает сигнал только с датчика D программного устройства П2 и начинается спиральное сканирование ионного луча ИЛ по обрабатываемой детали ОД. Переменный резистор R3 предназначен для регулировки диаметра растра.

В конце каждого цикла сканирования кулачок КЛ будет замыкать контакт МП1-1, что вызовет срабаты-

вание тягового электромагнита ЭТ, и счётно-импульсное реле П1 делает один отсчёт. После отсчёта заданного числа циклов контактный рычаг реле П1 замыкает контакт "СИ". При этом срабатывает реле P4, которое своим нормально-открытым контактом З2 блокирует контакт "СИ", нормально-замкнутым контактом З1 размыкает электромагнит сцепления ЭС (что возвращает контактный рычаг реле П1 в положение, соответствующее началу отсчёта), а нормально-замкнутым контактом З3 отключает реле P2. После отключения реле P2 своим нормально-замкнутым контактом З4 снова подаёт на вход первого катодного повторителя полное напряжение вторичной обмотки трансформатора Tr1 и останавливает сканирование, а нормально-открытым контактом З1 отключает реле P4. В схеме предусмотрена блокировка нормально-замкнутого контакта З4 реле P2 нормально-открытым контактом З4 реле P4, что необходимо для ускорения отключения сканирования после завершения последнего цикла, а также на случай залипания реле P2. После отключения реле P4 своим нормально-замкнутым контактом З1 замыкает электромагнит сцепления ЭС, после чего счётно-импульсное реле полностью готово к повторному отсчёту.

Реле P3 предназначено для исключения повторной ионной обработки одной и той же детали в случае, если кнопка КП1 будет нажата слишком долго, т.к. в этом случае нормально-замкнутый контакт кнопки КП-1 будет разомкнут и после отключения реле P2 его нормально-замкнутый контакт З3 не может включить реле P3, а, следовательно, реле P1 не будет подготовлено к новому пуску. Чтобы запустить вторично сканирование луча, надо кнопку КП-1 отпустить и нажать снова, когда сканирование отсутствует, т.е. после отключения реле P2.

Надёжность работы описанной схемы сканирования обеспечивается исключительной её простотой, большой устойчивостью работы катодных повторителей и неизнашиваемостью подвижного жидкостного контакта датчика программного устройства.

Аппроксимация функции  $U_m = \sqrt{U_{m0} - k_1 t}$  лома-



ной кусочно-непрерывной функцией была проверена на макете, соответствующему рис.2а; измерения напряжения между точками 1 и 2 в зависимости от расстояния между датчиком  $\Phi$  и первым электродом показали, что с практически необходимой точностью указанным методом не трудно получить функцию  $U \approx Ve$ . Схема автоматического отключения сканирования макетирована в полном объеме и её работоспособность полностью подтверждена.

Кроме описанного способа продолжительностью сканирования можно автоматически управлять от датчика дозы, помещаемого рядом с обрабатываемой деталью и подвергаемого ионной бомбардировке наравне с ней.

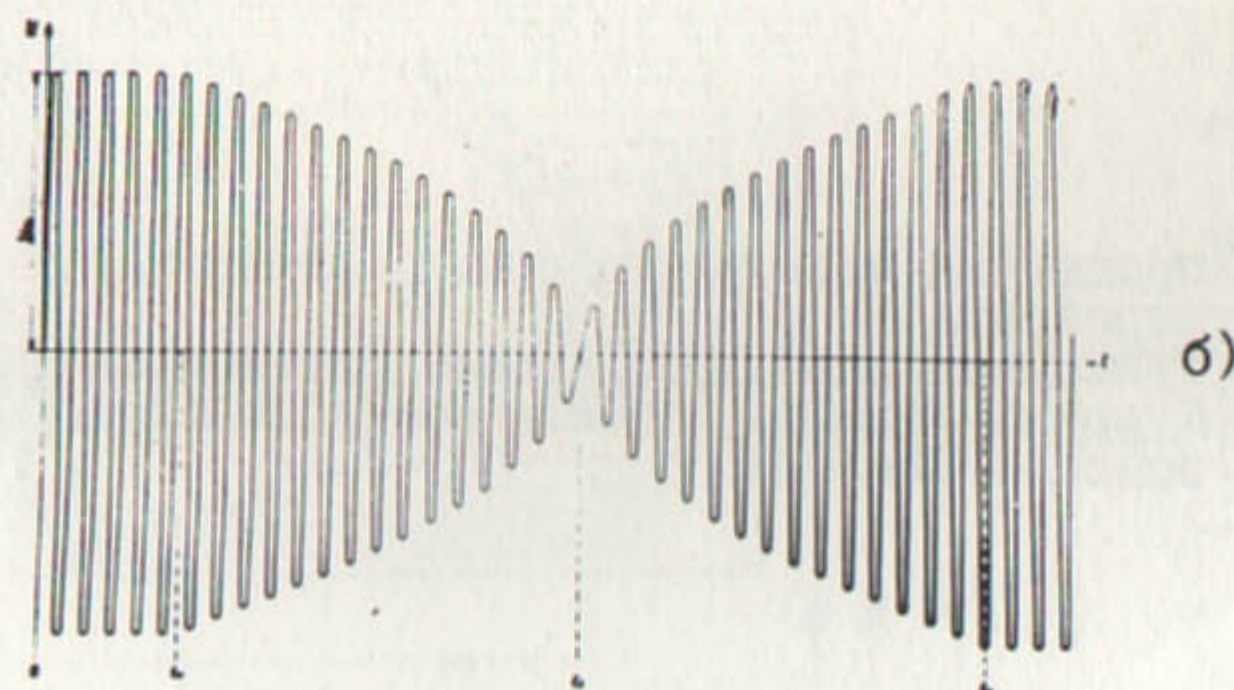
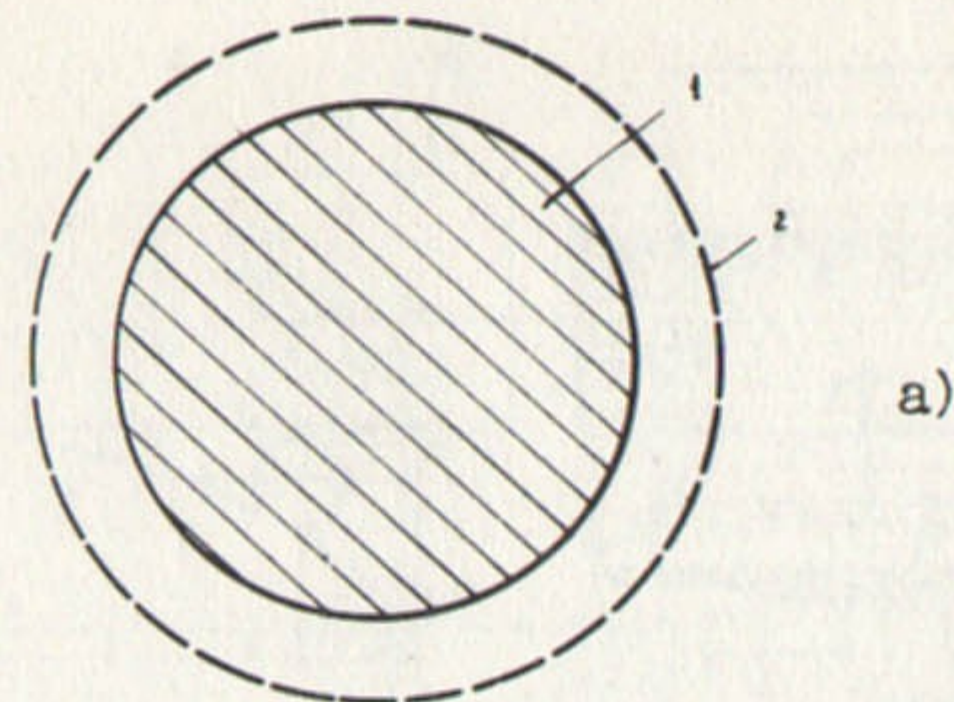


Рис. I

- а) 1- обрабатываемая поверхность, 2-ионный луч в отсутствии сканирования.  
 б) Напряжение на электродах сканирования за время одного цикла сканирования.  
 $t_0$  - момент начала цикла сканирования;  
 $t_1$  - ионный луч находится в центре обрабатываемой площади;  
 $t_2$  - момент окончания цикла сканирования.



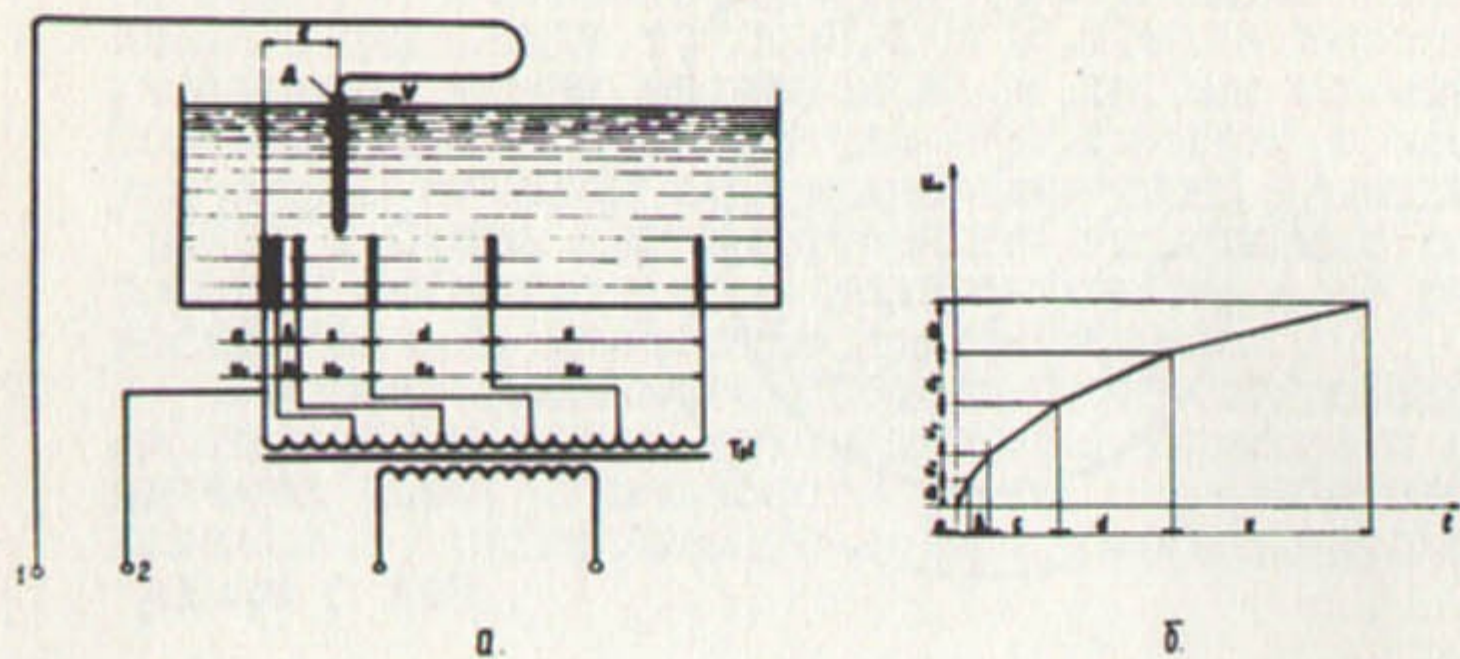


Рис.2 Упрощенная модель датчика программного устройства.  
 а) Функциональный жидкостный потенциометр.  
 б) Кусочно-ломаная линия, воспроизводящая закон  $U_m \cong \sqrt{t}$

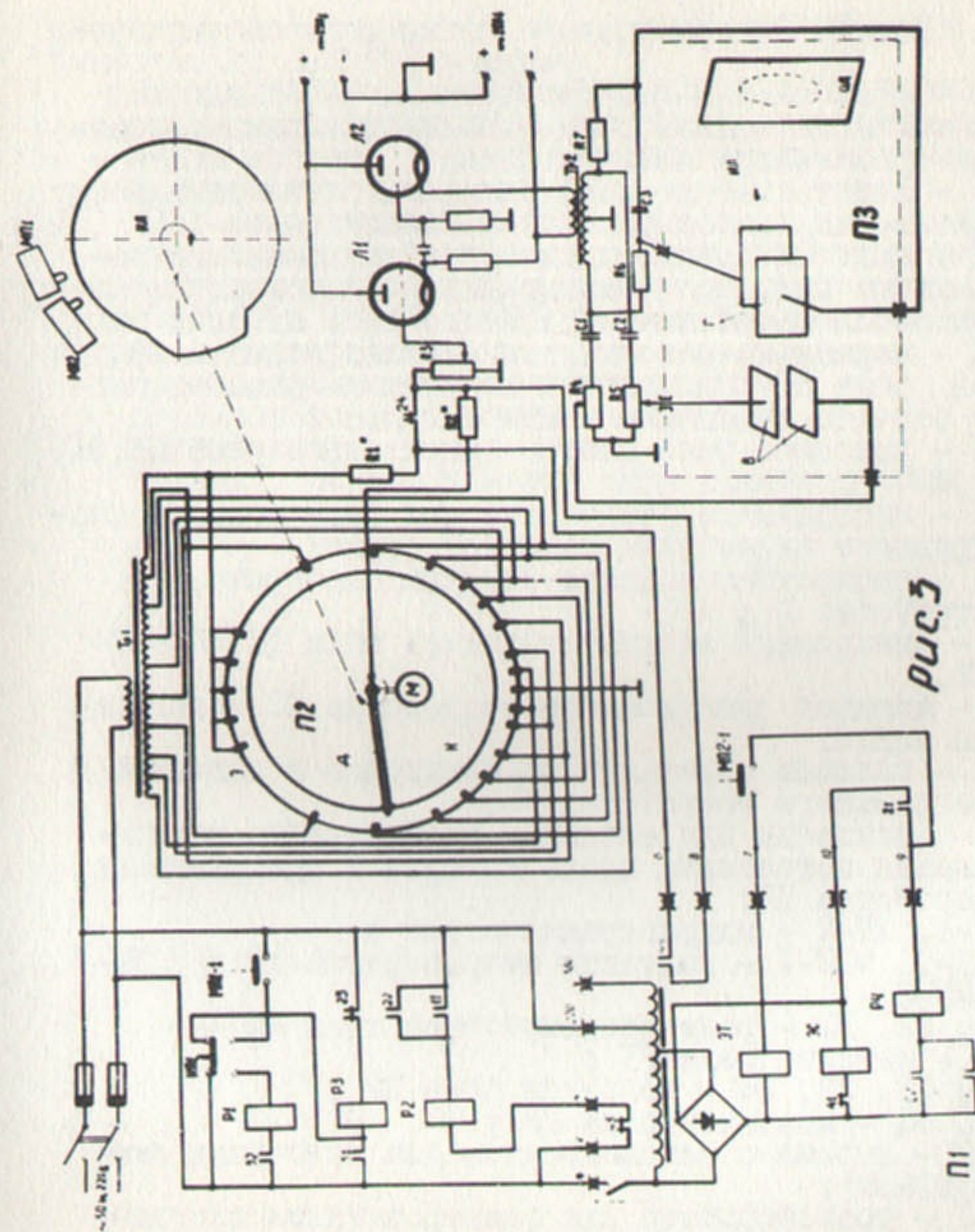


Рис.3



Рис.3. Функциональная схема системы сканирования.

П - реле счётно-импульсное типа Е-53I для подсчёта числа циклов сканирования и выдачи сигнала для прекращения сканирования;  
ЭС - электромагнит сцепления, подготавливающий счётно-импульсное реле П к началу счёта;  
ЭТ - тяговый электромагнит, срабатывающий от командного импульса и поворачивающий ось с контактным рычагом счётно-импульсного реле на один шаг;  
СИ - нормально-разомкнутый контакт отсчёта импульсов реле П (замыкается контактным рычагом после отсчёта заданного числа импульсов);  
P4 - выходное реле счётно-импульсного реле П; 4I, 42, 43 - контакты реле P4;  
П2 - программное устройство для формирования сканирующего напряжения заданной формы;  
Д - скользящий контакт (датчик) программного устройства П2;  
М - синхронный электродвигатель типа ДСД 60-П1-220,  
К - канавка программного устройства П2, заполненная водой;  
КЛ - кулачок, вращающийся синхронно с датчиком Д программного устройства П2;  
Э - электроды для создания необходимого распределения потенциала вдоль канавки К программного устройства П2;  
МП-1, МП-2 - микропереключатели;  
МП1-1, МП2-1 - контакты микропереключателей МП-1 и МП-2;  
P1, P2, P3 - реле промежуточное типа МКУ-48;  
I1 - контакт реле P1;  
21, 22, 23, 24 - контакты реле P2;  
31, 32 - контакты реле P3;  
КП1 - кнопка с самовозвратом для включения сканирования;  
Tr1 - трансформатор для электропитания программного устройства;

Tr2 - выходной трансформатор усилителя мощности сканирующего напряжения;  
Л1 - лампа катодного повторителя для предварительного усиления сканирующего напряжения по мощности;  
Л2 - лампа каскада усиления мощности сканирующего напряжения;  
R1\*, R2\* - согласующие резисторы;  
R3 - переменный резистор для регулирования диаметра максимального радиуса вращения ионного луча;  
R4, C1, R5, C2, R6, C7, C3 - фазосдвигающие цепочки;  
ПЗ - блок сканирования;  
Г - горизонтально-отклоняющие пластины;  
В - вертикально-отклоняющие пластины;  
ИЛ - ионный луч;  
ОД - деталь, обрабатываемая ускоренными ионами.



### Литература

- [1] . Гусев В.М. и др., ПТЭ, 1970, т.4, 19-23.  
[2] . Аброян И.А., У.Ф.Н., 1971, т.104, № 1, 15-50.  
[3] . Камке Detlaf, "Naturwissenschaften", 1970,  
т.57, № 7, 337-344.  
[4] . Thorson Michael W. "New. Scient.", 1970,  
т.48, № 729, 429-430.

---

Ответственный за выпуск Т.П. Стародубцева

---

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР.

250 экз.

МН 10256

20.4.72.

Заказ № 27