

И.Ф. Колпаков

13 - 3544

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ СХЕМ
И ИХ РАЗРАБОТКИ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
Ю.К.АКИМОВ

Дубна 1987

И.Ф. Колпаков

13 - 3544

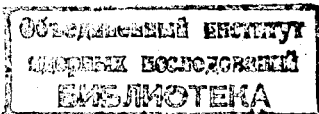
4933 Sp.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ СХЕМ
И ИХ РАЗРАБОТКИ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук

Ю.К.АКИМОВ



Регистрирующая аппаратура для физических экспериментов с быстрыми сцинтилляционными и другими детекторами частиц выполняется на основе ряда схем, к которым относятся формирователи импульсов с детекторов, схемы совпадений и пропускания, разветвители и смесители импульсов, интегральные и дифференциальные дискриминаторы, пересчетные схемы. Применяются также многоканальные системы: годоскопы и многоканальные временные анализаторы. Основное содержание настоящей диссертации составляет рассмотрение перечисленных выше типов схем на основе разработок, выполненных автором. Отдельным, наиболее важным и мало освещенным в литературе темам предпосланы подробные обзоры со сравнительным анализом и классификацией с указаниями по подходу к расчёту этих схем.

Так, одним из основных электронных приборов физического эксперимента является схема совпадений. К сожалению, вопросы классификации современных наносекундных схем совпадений, сравнительного анализа отдельных видов этих схем и подхода к их расчёту в целом в литературе не рассмотрены. Вообще отсутствует систематизированное рассмотрение формирователей импульсов, применяемых на входах схем временного анализа, как и рекомендации по использованию их разновидностей применительно к различным типам схем совпадений.

Между тем в течение последних 5-7 лет в области наносекундных схем совпадений наблюдался замечательный прогресс. С появлением быстрых импульсных диодов, высокочастотных транзисторов и туннельных диодов все многообразие быстродействующих специализированных схем совпадений было сведено к нескольким универсальным схемам. Стали использоваться формирователи схем совпадений регенеративного типа. Метод пересечения нуля, известный ранее

в сравнительно медленных совпадениях, получил дальнейшее развитие, в связи с чем были разработаны различные типы специальных формирователей - наносекундные дискриминаторы "нуля".

Для устранения указанных выше пробелов автором выполнен аналитический обзор современного состояния наносекундных схем совпадений и формирователей к ним, проведена их классификация, а также разработан подход к расчёту некоторых параметров двух важнейших типов схем совпадений. Большой объем данной темы привел к необходимости выделения ее в отдельную часть диссертации (часть 1), содержащую 6 глав.

В 1-й главе 4.1 для облегчения дальнейшего чтения приведены кратко основные сведения по поведению импульсных диодов, транзисторов в режиме переключения и лавинном режиме, туннельных и обращенных диодов ^{/1+3/} в наносекундном диапазоне. Вторая глава также, в основном, является вводной. Здесь рассматриваются некоторые вопросы передачи наносекундных импульсов от детекторов к входам электронных схем через высокочастотные кабели, разъемы, пассивные инверторы, трансформаторы и аттенюаторы. Описан блок переменной ступечатой задержки и дано определение предъявляемых к нему требований. Особое внимание уделено выбору входных схем, обеспечивающих наилучшее согласование.

В третьей главе приведены основные определения параметров и характеристик схем совпадений и формирователей к ним.

Формирователи необходимы, если требуется та или иная универсальность схем и приходится регистрировать частицы с разбросом по энергиям. Разрешающее время элемента отбора совпадений будет зависеть от точности привязки по времени импульса с выхода формирователя к исследуемому событию. Временные флуктуации прежде всего обусловлены статистическими процессами, происходящими в самом детекторе. Они приводят к "дрожанию" или "джиттеру" импульса. Кроме того имеется еще "гуляние" выходного импульса формирователя, связанное с трансформацией амплитудного разброса входных импульсов во временной, а также при использовании регенеративных формирователей, задержка срабатывания которых зависит от превышения амплитуды входного импульса над их порогом. Как и "дрожание", "гуляние" определяет разрешающее время последующих схем

совпадений. Показано, что из-за недостаточной широкополосности регенеративные схемы на транзисторах в наносекундном диапазоне неприменимы. Здесь используются туннельные диоды и транзисторы в лавинном режиме. Для определения качества формирования по амплитуде вводится новая характеристика - коэффициент

$$K = \frac{\Delta U_{\text{вх.}}}{\Delta U_{\text{вых.}}}, \quad (1),$$

который показывает, во сколько раз разброс амплитуд импульсов на выходе формирователя $\Delta U_{\text{вых.}}$ меньше, чем разброс амплитуд на его входе $\Delta U_{\text{вх.}}$. При последовательном включении формирователей качество формирования определяется как произведение коэффициентов K_i отдельных каскадов $\prod_i K_i$. При заданном элементе отбора совпадений и динамическом диапазоне амплитуд импульсов с детектора допустимый разброс амплитуд импульсов на входе элемента отбора определяет необходимую величину $\prod_i K_i$ и, отсюда, число требуемых каскадов формирователей.

В заключение этой главы рассматриваются методы, позволяющие улучшить точность временной отметки формирователями путем фиксации по временной оси одного из не зависящих от амплитудного разброса параметров импульса с детектора, в частности, методы с использованием двойного дифференцирования и контура. Последние методы требуют формирователей с отметкой времени по пересечению нулевого уровня сформированным биполярным импульсом - дискриминаторов "нуля".

Таким образом, основные схемы формирователей можно классифицировать по двум группам: формирователи с отметкой времени по переднему фронту импульса и дискриминаторы "нуля", рассмотрению которых посвящены две следующие главы.

В главе IV описаны формирователи с отметкой времени по переднему фронту импульса - диодные ограничители, транзисторные и туннельно-диодные формирователи, дана их классификация и приведены экспериментально полученные коэффициенты K для основных типов формирователей и некоторые другие параметры. Так, для параллельных диодных ограничителей $K = 1, 25 + 2$, Последовательные диодные ограничители имеют лучшие характеристики формирования: для них

$K = 4 + 63$ для разных типов диодов. Параллельно-последовательные диодные ограничители, являющиеся комбинацией двух упомянутых видов ограничителей, также хорошо формируют по амплитуде (K не менее 50), а временные характеристики их позволяют применять эти формирователи для компенсации "гуляния" регенеративных формирователей.

Из транзисторных формирователей рассмотрены последовательные транзисторные и транзисторно-диодные ограничители^{/4/}, транзисторно-диодные токовые ключи, широко распространенный как формирователь транзисторный токовый ключ на дифференциальном каскаде и формирователи на транзисторах в лавинном режиме.

Широполостность туннельных диодов позволяет с их использованием построить быстродействующие регенеративные формирователи с усилением, четким порогом срабатывания, относительно малыми "гулянием" и "мертвым" временем, а свойства их вольтамперной характеристики дают возможность получить хорошее качество формирования по амплитуде. Это привело к использованию туннельных диодов как элемента различных схем формирователей.

На основе параболической аппроксимации^{/1,2/} рассмотрены основные схемы туннельно-диодных формирователей: триггер Шмита, одновибратор и инвертор. При рассмотрении триггера Шмита выведены параметры вольтамперной характеристики туннельного диода с параллельно подключенным резистором. Поскольку одновибратор на туннельном диоде с индуктивностью представляет собой простую и весьма распространенную схему формирователя, уделено внимание выбору его оптимальных характеристик на основе метода обобщенных параметров. На основе этого универсального метода, который был развит в последнее время, дан обзор расчетов других импульсных схем - одновибратора на туннельном диоде с индуктивностью с нелинейным смещением и инвертора на туннельных диодах. Предпоследняя схема является перспективной из-за своего быстродействия. Частоты повторения ее составляют $200 + 300$ Мгц.

Коэффициент K для исследованных схем одновибраторов с индуктивностью на туннельных диодах составляет 30. Как правило, этого недостаточно, и обычно применяется последовательное включение каскадов одновибраторов. Тогда измеренный коэффициент K достигает 250 (в двухкаскадном формирователе). Недостатком одновибраторов с индуктивностью является непрямоугольная форма

выходного импульса, которая приводит к нестабильности кривых совпадений. Одновибраторы с линиями задержки и с задержанной отрицательной обратной связью, рассматриваемые также в диссертации, обеспечивают формирование плоской вершины импульса. Здесь описан также формирователь-инвертор с туннельными и обращенными диодами^{/5/}.

Глава V посвящена рассмотрению и классификации типов дискриминаторов "нуля": дискриминаторам с высокой чувствительностью, дискриминаторам с "гистерезисом" и с добавлением "пьедестала". Последние позволяют получить "гуляние" не более 0,3 нсек в относительном динамическом диапазоне амплитуд, равном 60.

Глава VI начинается с обзора схем отбора совпадений, которые классифицированы на схемы линейного сложения на линейном элементе, схемы линейного сложения на нелинейном элементе, например, на диоде или туннельном диоде^{/2,3/} (последние, ввиду их важности, выделены в отдельный раздел) и на схемы выбора меньшего, к которым относится прежде всего параллельная диодная схема совпадений. В обзоре анализируются лишь наиболее широко распространенные схемы совпадений, и не рассматриваются многие интересные классические схемы, которые имеют узкоспециализированное применение и редко используются в настоящее время.

В этой главе дан подход к расчёту основных схем - схемы линейного сложения на туннельном диоде и параллельной диодной схемы выбора меньшего. Схема сложения на туннельном диоде позволяет получить разрешающие времена $\approx 1 + 3$ нсек. Эта схема является пороговой, и основным при ее расчёте будет выбор тока смещения туннельного диода в элементе отбора $i_{см}$ в зависимости от допусков на величины элементов схемы, напряжения питания и параметры туннельного диода δ , динамического диапазона амплитуд входных импульсов $\Delta i_{вх}$, коэффициента K используемых формирователей и числа входов схемы N . Выведено соотношение, связывающее все перечисленные величины:

$$i_{см} = \frac{2N - (1 + \delta)}{K[(1 + \delta)^2 - 4\delta N]} \Delta i_{вх} \quad (2)$$

Здесь i - величина "ступеньки" тока, подаваемой на элемент отбора. Зная i и ток максимума туннельного диода I_1 , можно определить $i_{см}$. Максимальное число входов схемы $N_{макс.}$ связано с допуском δ следующим соотношением:

$$N_{макс.} = \frac{(1 + \delta)^2}{4\delta} \quad (3)$$

Если в качестве числового примера взять обычные требования, а именно $N = 4$, $\Delta i_{вх.} = 1000$ ма, $K = 100$ (двухкаскадный формирователь с $K_1 = K_2 = 10$) и $\delta = 0,05$, то $i = 23$ ма, и для туннельного диода с $I_1 = 10$ ма требуется обратное смещение по туннельной ветви, равное не менее 82 ма. Максимальное число входов (без учёта разброса амплитуд входных импульсов) для $\delta = 0,05$ равно 5. Поэтому схемы совпадений, выполненные полностью на туннельных диодах, хотя и обладают хорошим разрешением и быстродействием, но из-за разброса параметров число их входов не может быть более 3 + 4 даже при наличии подстроек. Увеличение числа входов может быть получено при введении усиления по току в формирователях. Однако поскольку чисто туннельно-диодные схемы чувствительны к наводкам, усиление по току приводит, в свою очередь, к понижению помехоустойчивости. Показано, что наилучшим решением является схема с транзисторными формирователями, которая, хотя и имеет несколько худшее временное разрешение, но работает в широком динамическом диапазоне входных амплитуд.

Параллельная диодная схема выбора меньшего позволяет, в принципе, получить совпадения с большим числом входов, не критична к разбросу элементов схемы (кроме характеристик диодов) и не требует больших величин K , который здесь может быть на порядок меньше. При расчёте диодной схемы наиболее важным является выбор типа диодов, поскольку в наносекундном диапазоне коэффициент отбора параллельной схемы выбора меньшего в сильной степени зависит от инерционности диодов, которая характеризуется временем восстановления $\tau_{восст.}$, временем установления $\tau_{уст.}$, временем жизни неосновных носителей τ и максимальным импульсным сопротивлением диода в прямом направлении $R_{д. пр. имп. макс.}$.

Был проведен расчёт коэффициента отбора \mathcal{P} для различных случаев с учётом инерционности диодов. Для длительности входного импульса $t_{имп.} = \tau_{восст.}$, $\tau_{уст.}$ и $R C_H$, где R и C_H - резистор и емкость нагрузки схемы,

$$\mathcal{P} = \frac{\frac{E}{i} + \frac{e^{-\frac{t_{имп.}}{\tau_{восст.}}}}{2 C_H (\frac{\tau_{восст.}}{R C_H} - 1)} \left[\frac{E - U_0}{i} - \frac{R_{макс. д. пр.} + \rho}{N} + \frac{\tau}{2 C_H (\frac{\tau_{восст.}}{R C_H} - 1)} \right] e^{-\frac{t_{имп.}}{R C_H}}}{\frac{N-1}{N} \left(1 + \frac{\tau}{2 \tau_{восст.}} e^{-\frac{t_{имп.}}{\tau_{восст.}}} \right) \left[(R_{макс. д. пр. имп.} - R_{д. пр.}) e^{\frac{t_{имп.}}{\tau_{уст.}}} + R_{д. пр.} \right] + \rho}$$

где E и i - напряжение источника питания и ток, задаваемый в диодную схему, $U_0 макс.$ - напряжение изгиба вольтамперной характеристики диода, $R_{макс. д. пр.}$ - наибольшее из прямых сопротивлений диодов схемы, $R_{д. пр.}$ - прямое сопротивление диода, ρ - согласующее сопротивление на входах схемы. Для типичной схемы, в которой $i = 4$ ма, $E = -2,3$ в, $U_0 = 0,3$ в (германиевый диод), $N = 4$, $R = 0,6$ ком, $C_H = 7$ пф, $\rho = 50$ ом, $R_{д. пр. имп.} = 50$ ом, $R_{д. пр.} = 20$ ом, $\tau = 3$ нсек, $\tau_{восст.} = 2$ нсек, $t_{имп.} = 4$ нсек, $\mathcal{P} = 3,5$, что согласуется с экспериментальными измерениями, в то время как, согласно расчётам без учёта инерционности диодов, $\mathcal{P} = 6,6$.

Нестрогие требования по K приводят к улучшению быстродействия схем совпадений, поэтому диодная схема является весьма перспективной по сравнению с туннельно-диодной, если учесть также возможность большего числа входов.

Показано расчётным путем, что интегрирование на выходе диодной схемы совпадений может приводить к увеличению коэффициента отбора. Проводится расчёт коэффициента отбора схем выбора меньшего на обращенных и СВЧ-диодах с учётом малых обратных сопротивлений этих диодов.

Рассмотрены также способы подключения антисовпадений к элементам отбора и сделана их сравнительная оценка с точки зрения эффективности антисовпадений.

В заключение Ч. 1 рассматриваются конструктивные тенденции выполнения быстрых схем для физических экспериментов: блочные схемы и модули.

В части II диссертации, в основном, представлены результаты разработок электронных схем, выполненных автором. Она состоит из четырех глав.

Глава I посвящена схемам совпадений и логическим схемам для временных измерений. Здесь описана одна из первых отечественных в полупроводниковом исполнении 4-канальных схем совпадений с каналом антисовпадений, работающая по принципу линейного сложения токов на туннельном диоде, предназначенная для временного анализа событий, регистрируемых быстрыми спинтилляционными счётчиками. Разрешающее время схемы ≈ 10 нсек, "мертвое" время - 30 нсек. На входах схемы применялись формирователи на транзисторно-диодных токовых ключах^{/4/}.

Представлены также результаты исследования схем, разработанных на основе модулей с одновибраторами на туннельных диодах ГИ305А и ГИ301Г с индуктивностью^{/8/}. Была выполнена схема тройных совпадений с разрешающим временем 1 нсек, "мертвым" временем - менее 30 нсек и мажоритарная схема выбора "два или более из шести" с разрешающим временем ≈ 3 нсек. Схемы с использованием одновибраторов на основе быстродействующих туннельных диодов из р-германия были по отечественным публикациям выполнены впервые. Результаты испытаний схем с одновибраторами на туннельных диодах с индуктивностью показали, что эти схемы обладают хорошим быстродействием, но из-за разброса параметров туннельных диодов и малой помехоустойчивости последних ограничены по числу входов двумя-тремя.

В этой главе рассмотрена схема смесителя на 4 входа, работающего до частот повторения импульсов 100 Мгц. На выходе смесителя использован амплитудный ограничитель нового типа на токовом ключе на транзисторах с дополнительной симметрией. Описана также схема разветвителя на 4 выхода, необходимого в единой системе наносекундных блоков для физических экспериментов^{/8/}. Разветвитель выполнен по распределенному принципу. Дан подход к расчёту подобных разветвителей. Рассматриваемым схемам смесителя и разветвителя предпосланы краткие сравнительные обзоры.

Глава II охватывает схемы для амплитудных измерений в наносекундном диапазоне. Она начинается обзором и классификацией наносекундных линейных схем пропускания, после которого рассматривается разработанная автором схема наносекундных линейных "ворот"^{/5/}, первая в транзисторном варианте, описанная в отечественной литературе. Коэффициент передачи схемы равен 0,9, динамический диапазон составляет 0,1 - 8 в. Линейность схемы $\pm 1\%$. Частота повторения импульсов - до 100 Мгц. Схема обладает также хорошими временными характеристиками и широко используется в экспериментах на ускорителях.

В этой главе описаны также интегральный и дифференциальный дискриминаторы^{/6,7/}. Интегральный дискриминатор выполнен с использованием туннельных диодов ГИ301Г. Динамический диапазон его - 0,3 - 12 в. Интегральная нелинейность - не более 0,9%, "мертвое" время - не более 40 нсек^{/7/}. Дискриминатор нашел широкое применение в экспериментах на ускорителях. Дан сравнительный обзор схем интегральных дискриминаторов. Дифференциальный дискриминатор выполнен по схеме с "окном" с разделением во времени анализируемого импульса с последовательным анализом на одном и том же интегральном дискриминаторе. Хотя схемы такого рода дискриминаторов известны, логика его имеет новое решение, более простое в сравнении с известными схемами. Параметры дискриминатора с "окном" близки к параметрам интегрального дискриминатора.

Глава III посвящена быстрым пересчётным схемам на транзисторах и туннельных диодах. Прежде всего дается сравнительный обзор транзисторных пересчётных схем, обычно используемых на частотах ниже 100 Мгц. Затем описывается разработанная автором универсальная пересчётная декада^{/8+10/}, выполненная по системе 1-2-4-8. Новым в схеме декады является использование только одной схемы "И" в логике второго триггера. Декада оказалась более надежной, чем обычные схемы с двумя последовательно включенными схемами "И". Разрешающее время декады составляет 30 нсек. Далее в этой главе дается сравнительный обзор основных триггерных и пересчётных схем на туннельных диодах, которые нашли применение на частотах до 100 Мгц и выше. Исследовались различные способы задания напряжения питания на триггерную схему на двух туннельных диодах из р-германия с индуктивностью: делитель на сопротивлениях, диодный стабилизатор на переходе эмиттер-база транзистора. Наилучшей оказалась оригинальная схема с общей базой с подключением триггера в эмиттер, которая при задании начальной рабочей точки с регулировкой нечувствительна к измене-

нию напряжения питания в широких пределах (+300%), либо при задании начальной рабочей точки без подстройки - к разбросу элементов, характеристик транзисторов и туннельных диодов в температурном диапазоне +10 + 40°C. Приведены экспериментальные результаты и графический расчёт. Выполнена пересчётная схема на 16 на частоту 100 Мгц, работающая в широком диапазоне напряжений питания.

В IV главе описаны разработки многоканальных систем для временных измерений. Прежде всего приведена 24-канальная система быстрых ворот, предназначенная для многосчётчиковых экспериментов, где используются ФЭУ с пластическими сцинтилляторами. Ворота открываются сигналом управления, поступающим от разветвителя наносекундных импульсов на 24 канала, который является частью системы. Минимальное разрешающее время ворот равно 3 нсек. Система имеет выходы на промежуточное запоминающее устройство и индикацию на неоновых лампочках.

Отличительной особенностью системы в целом является разделение ее на блоки разветвителей и ворот, что позволяет использовать эти блоки самостоятельно и увеличивает гибкость устройства /8,11/.

Рассмотрение преобразователя время - цифровой код начинается со сравнительного обзора современного состояния временных кодировщиков. Далее описан разработанный автором преобразователь время - цифровой код, выполненный по старто-стопному принципу, в котором измеряемый временной интервал преобразуется в число периодов генератора с частотой 100 Мгц /12/. Сигналы с генератора считаются пересчётным устройством на 100 Мгц с ёмкостью 10^{12} с последующей параллельной переписью в запоминающее устройство на 4096 слов. Число каналов преобразователя, соответственно, равно 4096 с шириной канала 10 нсек. Преобразователь снабжен логикой и блокировками, необходимыми при временных измерениях с μ -мезонами. Дифференциальная нелинейность преобразователя составляет $\pm 1\%$. Максимальная частота регистрации событий - 10^3 интервалов в секунду.

Отечественная схема кодировщика в таком диапазоне с кварцевой стабилизацией частоты генератора описана в полупроводниковом варианте впервые.

В ы в о д ы

Основные итоги диссертации можно сформулировать в виде нижеследующих выводов, приведенных в последовательности изложения материала.

1. Проведено сравнение различных типов согласующих схем на входах и сформулированы требования к формирователям на входах схем совпадений. Введен коэффициент K , показывающий качество формирования по амплитуде, который при заданном динамическом диапазоне амплитуд на входах позволяет выбрать тип элемента отбора совпадений или рабочую точку последнего, или наоборот - при заданном типе элемента отбора выбрать необходимый формирователь. Рассмотрены параметры формирователей, влияющие на разрешающее время схем совпадений, такие как "дрожание", обусловленное статистическими свойствами самих детекторов, и "гуляние", которое связано, во-первых, с трансформацией амплитудного разброса входных импульсов во временной, и, во-вторых, появляющееся при использовании регенеративных схем формирователей из-за ограниченной широкополостности используемых активных элементов. Показана неприемлемость регенеративных транзисторных формирователей из-за большого "гуляния" в наносекундном диапазоне.

2. Дана классификация современных методов формирования и выполнен обзор схем формирователей с отметкой времени по переднему фронту импульса: диодных, туннельно-диодных и транзисторных.

Выполнен обзор дискриминаторов "нуля" - формирователей с отметкой времени по пересечению нулевого уровня сформированным биполярным импульсом с детектора, - чувствительных дискриминаторов, дискриминаторов с гистерезисом и добавлением "пьедестала".

3. Измерены величины K для различных типов диодных и туннельно-диодных формирователей, что позволяет практически оценить применимость данного формирователя и выбрать требуемый его тип.

4. Дан обзор выбора оптимальных характеристик схем одновибраторов с линейным и нелинейным смещением с индуктивностью и импульсного инвертора на туннельных диодах методом обобщенных параметров, который позволяет наиболее полно при любой заданной форме входного импульса провести расчет параметров схем с туннельными диодами.

5. Выполнена классификация современных схем совпадений, которые подразделяются на схемы линейного сложения на линейном элементе, схемы линейного сложения на элементе с нелинейной характеристикой, в том числе схемы линейного сложения на туннельных диодах, и схемы выбора меньшего.

6. Для схем линейного сложения на туннельном диоде, которые наиболее широко распространены, выведено выражение, связывающее коэффициент формирования K , динамический диапазон амплитуд на входах, число входов, допуск на элементы схемы и величину тока смещения элемента отбора. Таким образом, с помощью данного выражения можно при определенном динамическом диапазоне на входах, допусках, коэффициенте и числе входов выбрать рабочую точку элемента отбора, либо при заданном смещении элемента отбора, допусках, числе входов и динамическом диапазоне на входах определить тип пригодного формирователя. Из выражения следуют ограниченные возможности схем совпадений, выполненных полностью на туннельных диодах.

7. Выведены выражения для определения коэффициента отбора параллельных диодных схем совпадений с учетом импульсных свойств и параметров диодов. Показана перспективность многоканальной диодной схемы совпадений с быстрыми импульсными диодами в наносекундном диапазоне из-за нестрогих требований к коэффициенту K формирователей. Показана возможность увеличения коэффициента отбора диодной схемы при интегрировании выходного импульса. Выведено выражение для коэффициента отбора параллельных схем совпадений на туннельных, обращенных и СВЧ - диодах.

Дан обзор способов подключения формирователей антисовпадений к элементам отбора.

8. Рассмотрены тенденции в конструировании наносекундной аппаратуры для физических экспериментов: модульные схемы, применение быстродействующей логики цифровых вычислительных устройств и возможность работы быстрой электроники на линии с цифровой вычислительной машиной.

9. Разработана первая из описанных в отечественной литературе многоканальных схем совпадений наносекундного диапазона на туннельных диодах из р-германия с транзисторными формирователями.

10. Исследованы схемы совпадений с одновибраторами на туннельных диодах в модульном исполнении, и изучены практические ограничения, накладываемые

на работу этих схем. Разработана мажоритарная схема на одновибраторах на туннельных диодах в модульном исполнении.

11. Дан сравнительный обзор по схемам смесителей и разветвителей. Разработан подход к расчёту распределенного разветвителя на транзисторах. Разработаны схемы смесителя и разветвителя.

12. Проведен обзор линейных схем пропускания наносекундного диапазона и проведена их классификация. Разработана первая из описанных в отечественной литературе схема пропускания на транзисторах наносекундного диапазона с высокими характеристиками. Линейность схемы - $\pm 1\%$. Амплитудный диапазон - $0,1+8$ в. Разработана схема удлинителя импульсов наносекундного диапазона.

13. Проведено сравнение характеристик интегральных дискриминаторов, и разработана схема интегрального дискриминатора на туннельных диодах с линейностью $0,9\%$ в диапазоне амплитуд $0,1+8$ в с "мертвым" временем 30 нсек.

14. Разработана новая схема дифференциального амплитудного дискриминатора с "окном".

15. Проведены сравнительные оценки быстродействующих пересчётных схем на транзисторах. Разработана универсальная пересчётная декада на транзисторах с разрешающим временем 30 нсек.

16. Выполнен сравнительный обзор по современным триггерным и пересчётным схемам с туннельными диодами.

Исследованы с точки зрения устойчивости задания статической рабочей точки различные типы схем смещения триггера на двух туннельных диодах с индуктивностью. Разработана двойная пересчётная схема на 100 Мгц с туннельными диодами. В схеме используется оригинальная схема триггера на двух туннельных диодах с индуктивностью, включенного в эмиттер транзистора. Запуск триггера осуществляется через одновибратор, включенный в базу этого транзистора.

17. Разработана 24-канальная система "ворот" для экспериментов с годоскопическими установками на транзисторах и туннельных диодах в блочной взаимозаменяемой конструкции.

18. Выполнен сравнительный обзор современных многоканальных временных преобразователей время - цифровой код. Разработан первый из описанных в литературе отечественный временной "кодировщик" на 4096 каналов с шириной канала 10 нсек с кварцевой стабилизацией частоты задающего генератора на транзисторах и туннельных диодах.

19. Большинство разработанных схем нашло широкое применение. На основе описанных разработок автора был осуществлен мелкосерийный выпуск схем наносекундного диапазона для физических исследований: линейных "ворот", разветвителя, смесителя, дискриминатора интегрального, дискриминатора дифференциального и других. На основе разработанной автором декады на транзисторах производится крупносерийный выпуск декад ОИЯИ и осуществлен ряд модификаций пересчётных приборов, выпущенных мелкой серией. Основные результаты диссертации опубликованы в отечественных журналах и препринтах ОИЯИ и доложены на отечественных и зарубежных симпозиумах и конференциях.

Л и т е р а т у р а

1. И.Ф.Колпаков. Препринт ОИЯИ, 1362, Дубна (1963).
2. И.Ф.Колпаков. Препринт ОИЯИ, Р-1833, Дубна (1964).
3. А.А.Иванов, И.Ф.Колпаков, Л.А.Тимохин. Применение туннельных диодов в приборах ядерной физики, Атомиздат, М., 1967.
4. И.Ф.Колпаков. Приборы и техника эксперимента, №5, 99 (1964).
5. И.Ф.Колпаков И.Ф., Препринт ОИЯИ, 2278, Дубна (1966).
6. I. F. Kolpakov, Symposium uber Kemelektronik im Rossendorf, ZfK - 121, z.175 - 192, Dresden, 1965.
7. И.Ф.Колпаков. Приборы и техника эксперита №5, 127+131 (1966).
8. И.Ф.Колпаков И.Ф. Приборы и техника эксперимента, № 8, 61 (1981).
9. И.Ф.Колпаков. Приборы и техника эксперимента, № 6, 55 (1982).
10. Зеленов Б.А., Колпаков И.Ф., Н.С.Мороз., Преобразующие устройства в системах автоматики, № 4-64-887/26, ГОСИНТИ, М., 1964.
11. И.Ф.Колпаков. Препринт ОИЯИ, 2318, Дубна (1965).
12. В.М.Гребенюк, И.Ф.Колпаков. Препринт ОИЯИ, 13-3271, Дубна (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел

13 октября 1967 года.