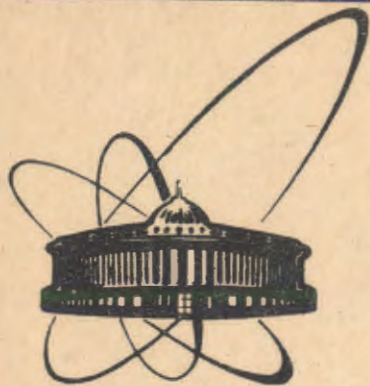


90-511



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P13-90-511

Л.С.Барабаш, Н.В.Горбунов, Ю.Б.Дубасов\*,  
Ю.М.Иванюшенков\*, Е.Н.Козаренко,  
В.А.Калинников, А.Г.Карев, Е.А.Ладыгин,  
Э.И.Мальцев, А.Г.Пименов, Ю.П.Петухов, А.А.Попов

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС-РЕГИСТРОВ

---

\*Институт физики высоких энергий, Протвино

1990

Измерение координат треков частиц по центру тяжести зарядовых распределений, возникающих в газовых проволочных детекторах, позволяет значительно увеличить точность регистрации треков в детекторе. Вычисление координат по центру тяжести распределения заряда, индуцированного на катодных стрипах пропорциональной камеры, дает возможность получать точности регистрации треков  $\approx 50$  мкм [1,2]. В работах [3] метод центра тяжести применен для измерения временных координат треков с использованием быстрых аналогово-цифровых преобразователей (FADC) и аналоговых линий задержки. В этом случае точность измерения временной координаты можно оценить по формуле [4]:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{Q} T, \quad (1)$$

где  $\Delta Q / Q$  - относительная погрешность в измерении полного заряда, выделенного в лавине,  $T$  - период считывания временной координаты (формула может быть использована при ТЧНММ импульса с сигнальной проволоки).

В данной работе приводятся исследования канала регистрации временной координаты, в котором для запоминания аналоговой информации используется динамическая память на ПЗС-регистре, что позволяет реализовать высокую точность регистрации временной координаты, осуществить мультиплексирование сигналов и оптимизировать соотношение между количеством каналов в числом блоков FADC в системе регистрации информации в зависимости от загрузки.

В настоящее время создано несколько систем считывания информации из время-проекционных камер [5], в которых запоминание аналоговой информации осуществляется в приборах с зарядовой связью (ПЗС), предложено несколько модификаций ПЗС для регистрации информации из полупроводниковых микростриповых детекторов [6]. Использование ПЗС-структур в таких системах представляется весьма перспективным, так как эти приборы обладают рядом важнейших функциональных и конструктивно-технологических достоинств, основными из которых являются [7]:

- возможность записи, хранения и направленной передачи аналоговой информации,

- малая потребляемая мощность (5-10 мкВт / бит в режиме передачи),

- высокая интеграция ( $10^5$  элементов в одном кристалле),

- высокая плотность упаковки (более  $10^5$  бит / см<sup>2</sup>),

- малое количество внешних выводов.

Эти особенности ПЗС-структур являются определяющими при построении высоконадежных сложных систем. Кроме того, простота конфигурации и регулярность элементов позволяют создавать специальные образцы ПЗС с быстродействием до нескольких сотен МГц.

В ПЗС-регистрах входная информация представляется отличающимися по величине зарядовыми пакетами подвижных носителей, которые хранятся в потенциальных ямах, образующихся у поверхности полупроводникового кристалла под действием внешнего электрического поля. Подавая соответствующие управляющие импульсы на цепочку МДП-элементов, из которых состоит регистр, обеспечивается направленная передача информации. Введение зарядового пакета (запись) может осуществляться либо входным p-n-переходом, расположенным вблизи крайнего элемента, либо свето- или термогенерацией. Вывод информации обычно осуществляется с помощью выходного встроенного p-n-перехода.

Рассмотрим основные параметры ПЗС-регистров. Процессы термогенерации и диффузия электронно-дырочных пар в объеме полупроводника приводят к накоплению в потенциальных ямах паразитных зарядов, которые искажают полезную информацию. Основной вклад в накопление паразитных зарядов вносят токи генерации в объеме полупроводника, плотность которых пропорциональна глубине обедненного слоя  $\chi_{об}$ :

$$j_{G об} = q g \chi_{об}$$

где  $g = n_i \sigma_v \nu_T N_{об}$  - скорость генерации в носителей в обедненном слое,  $N_{об}$ ,  $\sigma_v$ ,  $\nu_T$  - плотность объемных центров, сечение взаимодействия и тепловая скорость носителей, соответственно. Время хранения у современных ПЗС довольно большое и может достигать десятков секунд.

Эффективность передачи аналоговой информации в ПЗС определяется следующим выражением:

$$\eta = 1 - (\xi_1 + \xi_2),$$

где  $\xi_1$  - коэффициент потерь, обусловленных захватом

части носителей на границе диэлектрик-полупроводник (низкие частоты),

$\xi_2$  - коэффициент, определяющий часть зарядового пакета, не перешедшего в соседнюю ячейку за время такта сдвига (высокие частоты).

Потребление мощности в ПЗС происходит только в режиме передачи заряда. Мощностью, потребляемой в режиме хранения за счет токов утечки и термогенерации, можно пренебречь. Тогда средняя мощность, потребляемая в ПЗС за время такта  $T$ , равна

$$P = W / T,$$

где  $W = Z h Q_p (U_{зап} - U_{хр})$  - полная энергия, отдаваемая тактовым генератором,  $Z$  и  $h$  - ширина и длина затвора в ПЗС,  $Q_p$  - объемный заряд подвижных носителей. Так, например, для ПЗС с параметрами:  $Z = 20$  мкм,  $h = 6$  мкм,  $U_{зап} = 20$  В,  $U_{хр} = 10$  В - потребляемая мощность на частоте  $f = 16$  МГц составляет 40 мкВт/бит, на частоте  $f = 1.6$  МГц - 4 мкВт/бит.

#### Схема ПЗС-регистра СТМ-23.

Схема исследованного ПЗС- регистра СТМ-23 показана на рис. 1. ПЗС СТМ-23 представляет собой 2-х фазный сдвиговый регистр с объемным каналом и состоит из 64-разрядного регистра сдвига и входного и выходного устройств.

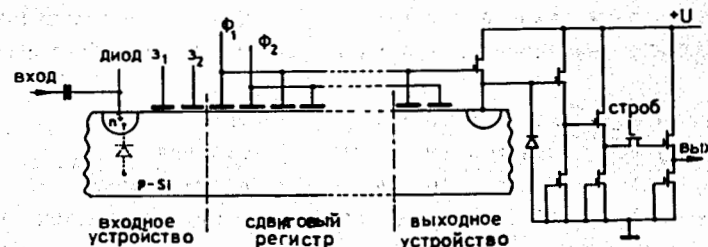


Рис. 1. Схема ПЗС-регистра СТМ-23:  $Z_1, Z_2$  - затворы входного МОП-транзистора,  $\Phi_1, \Phi_2$  - управление сдвиговым регистром.

Входные диод и затворы можно рассматривать как МОП-транзистор с индуцированным каналом, который преобразует входное напряжение во входной заряд. Возможны два варианта включения ПЗС-регистра по входу:

- аналоговый сигнал подается на входной диод,
- аналоговый сигнал подается на входной затвор.

Предпочтительным является управление по входному диоду, поскольку при этом достигается большее быстродействие.

В зависимости от управляющих потенциалов МОП-транзистор может работать как в активной области, так и в режиме насыщения. В режиме насыщения при нулевом тактовом потенциале МОП-транзистор заперт, при потенциале  $U = +15В$  транзистор открыт и под электродом первого элемента регистра сдвига может накапливаться заряд, зависящий от входного напряжения. При этом ПЗС-регистр чувствителен к входным сигналам в течение половины периода тактирования. В активном режиме транзистор открыт и ПЗС-регистр чувствителен в течение всего времени такта.

Заряд, накопленный в потенциальной яме ПЗС-регистра в течение периода тактового генератора, определяется следующим выражением

$$Q_p = \int_0^T g(t) \frac{U_{BX}(t)}{R_{BX}(t)} dt + j_c(x_{об}) T, \quad (2)$$

где  $j_c(x_{об})$  - плотность тока термогенерации и диффузии в обедненном слое шириной  $x_{об}$ ,  $R_{BX}(t)$  - дифференциальное входное сопротивление ПЗС-регистра,  $g(t)$  - коэффициент передачи ПЗС, зависящий от режимов работы МОП-транзистора, причем

$$\begin{aligned} g(t) &= 1 & \text{при } t &= (0 - T/2) & \text{режим} \\ g(t) &= 0 & \text{при } t &= (T/2 - T) & \text{насыщения} \\ g(t) &> 1 & \text{при } t &= (0 - T) & \text{в активном режиме.} \end{aligned}$$

В случае, когда параметры ПЗС-регистра постоянны в интервале интегрирования (сравнительно малой величиной  $j_c(x_{об})T$  можно пренебречь), выражение (2) можно привести к виду

$$t = k(t) Q_p, \quad (3)$$

где  $k(t) = \frac{R_{BX}(t)}{U_{BX}(t) g(t)}$  - временная чувствительность ПЗС-регистра. Таким образом, зная временную чувствительность

ПЗС-регистра, можно измерять временные интервалы по записанной входной информации. Как видно из выражения (3), временная чувствительность зависит только от амплитуды входного сигнала и коэффициента передачи ПЗС.

Для экспериментального измерения временной чувствительности на вход ПЗС-регистра подавался перепад напряжения, имеющий временную привязку к фронту тактового сигнала. В этом случае для оценки времени задержки входного сигнала относительно тактового импульса достаточно исследовать зависимость

$$k(t) \Big|_{t=(0-T)} = \frac{Q_i}{Q_{i+1}}, \quad (4)$$

где  $Q_i$  - заряд в  $i$ -той ячейке ПЗС-регистра, в которую попадает фронт исследуемого сигнала (см. рис. 2).

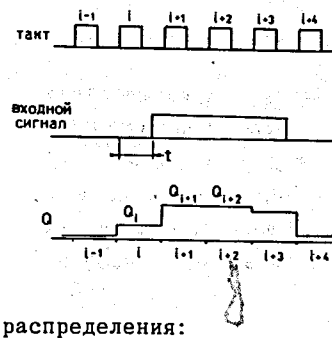


Рис. 2. Временные диаграммы работы ПЗС-регистра.

При исследовании временной чувствительности ПЗС для экспоненциального импульса (перепад напряжения подавался на вход через емкость 2пФ.) время оценивалось по центру тяжести регистрируемого зарядового

распределения:

$$k(t) = \frac{\sum n_i Q_i}{\sum Q_i}, \quad (5)$$

Кроме того, для измерения времени прихода импульса использовалась зависимость (3) и зависимость

$$k(t) = \frac{Q_i}{\sum Q_i}, \quad (6)$$

где  $\sum Q_i$  - регистрируемый полный заряд.

Схема для исследования характеристик ПЗС включала:

- блок ПЗС-регистров с регулируемыми источниками смещений для выбора режимов работы по входному диоду, затворам и подложке,

- блок генераторов - драйверов, позволяющий осуществлять

запись и считывание информации из ПЗС-регистра на частоте 25 МГц и меньших частотах, кратных этой частоте,

- блок управления и синхронизации для выработки управляющих сигналов, сфазированных с частотой записи,
- блоки переменных задержек и формирователей,
- аналого-цифровой преобразователь (FADC) типа Ф4226,
- персональный компьютер "Правец - 16"

Запись информации в ПЗС производилась на частоте 25 МГц. Выбор тактовой частоты определялся тем, что для выходного устройства ПЗС она является граничной. По прошествии 64 периодов, необходимых для записи информации, ПЗС-регистр переводился в режим считывания, которое производилось на частоте 12.5 МГц, что определялось частотными возможностями FADC. Информация, записанная в ПЗС, оцифровывалась, записывалась в память FADC и, далее, передавалась в ПК.

#### Результаты исследований

На рис. 3 и 4 показаны передаточные характеристики ПЗС-регистра по напряжению и по заряду при управлении по входному диоду. При измерении этих характеристик сигналы на вход ПЗС подавались через разделительные емкости 68 нФ и 2 пФ, что позволяло рассматривать источник сигнала как источник напряжения и источник заряда, соответственно. Входной динамический диапазон ПЗС составил:

- по напряжению 0.3 В
- по заряду (2 - 3) пК

Входная и выходная емкости ПЗС, вычисленные по передаточным характеристикам, составили  $C_{ВХ} = 5$  пФ,  $C_{ВЫХ} = 0.06$  пФ.

Для вычисления дифференциального входного сопротивления  $R_{ВХ}$  применялись два метода:

- определение  $R_{ВХ}$  по постоянной времени спада входного импульса,
- из передаточной характеристики.

В результате, значение дифференциального входного сопротивления получено равным  $R_{ВХ} = 50$  КОМ.

Для исследования временной чувствительности  $k(t)$  на вход ПЗС-регистра подавался прямоугольный импульс амплитудой  $U_{ВХ} =$

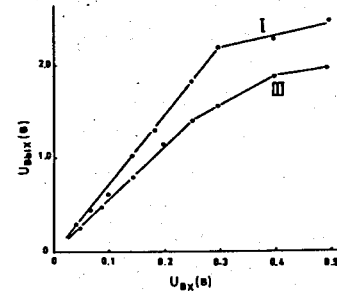


Рис. 3. Передаточная характеристика ПЗС - регистра по напряжению.

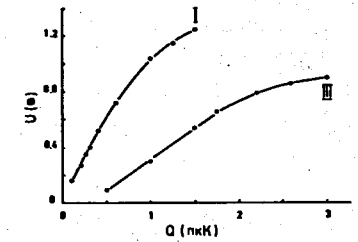


Рис. 4. Передаточная характеристика ПЗС - регистра по заряду.

(I, III-режимы согласно таблице 1)

100мВ с длительностью фронта порядка 3нс. При различных режимах работы МОП-транзистора, по отношению  $Q_1/Q_{1+1}$  оценивалась ошибка измерения времени прихода импульса относительно тактового импульса. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режим работы	$U_D$ (В)	$U_{31}$ (В)	$U_{32}$ (В)	$\sigma_{отн}$	$\sigma$ (нсек)
I	-5.8	9.3	-4.4	0.0135	0.31
II	-5.6	7.2	-4.4	0.0153	0.42
III	-5.8	4.8	-4.0	0.0181	0.50
IV	-5.8	3.4	-3.5	0.0178	0.56
V	-5.8	3.0	-2.0	0.0190	0.60
VI	-5.8	2.2	-3.0	0.0175	0.62
VII	-5.8	0	-1.0	0.0185	0.84
VIII	-4.7	0.7	-1.7	0.0197	1.28
IX	-5.8	-2.3	1.4	0.0183	1.54
X	2.0	4.0	10	0.023	1.59

Измерения проведены при  $U_T = 6.3В$  и  $U_{II} = -8.1В$ .

Из результатов измерений видно, что в зависимости от напряжений смещения  $U_D$ ,  $U_{31}$  и  $U_{32}$  наблюдаются следующие области работы входного МОП-транзистора: активный линейный режим, режим насыщения и активный нелинейный режим. На рис. 5. приведены зависимости временной чувствительности ПЗС-регистра при активном линейном режиме работы МОП-транзистора (II), в режиме насыщения (X) и в активном нелинейном режиме (IV).

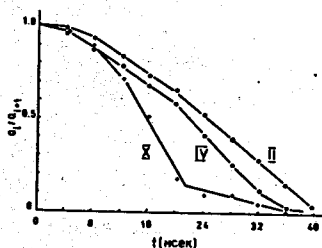


Рис. 5. Временная чувствительность ПЗС - регистра при различных режимах входного МОП - транзистора: II-активный линейный режим, IV - активный нелинейный режим, X-режим насыщения.

Как видно из рисунка, в зависимости от напряжений смещения на элементах МОП-транзистора, ПЗС-регистр может быть чувствителен в течение всего периода сдвига, либо в течение его половины. Предпочтительным является активный линейный режим, поскольку в остальных режимах для обеспечения чувствительности в течение всего такта сдвига возникает необходимость использования второго ПЗС-регистра, обеспечивающего чувствительность во втором полупериоде тактовой частоты.

На рис. 6. приводятся зависимости измерения времени от задержки входного импульса относительно такта сдвига в активном линейном режиме для прямоугольного (1) и экспоненциального (2) импульсов с амплитудой 100 мВ. Усредненные по периоду ошибки измерения времени составляют  $\sigma = 0.5$  нс и  $\sigma = 1.2$  нс, соответственно.

На рис. 7. показаны зависимости ошибок измерения времени от амплитуды входного экспоненциального импульса при двух частотах сдвига: 1 - частота сдвига 25 МГц ( $T = 40$  нсек) и 2 - частота 12.5 МГц ( $T = 80$  нсек). Используя формулу (1), можно оценить собственные шумы ПЗС при этом режиме работы, которые составляют  $\approx 5 \cdot 10^{-15}$  К.

При исследовании зависимости ошибок измерения времени от длительности входного сигнала на вход ПЗС подавался экспоненциальный импульс длительностью от 75 до 250 нс.

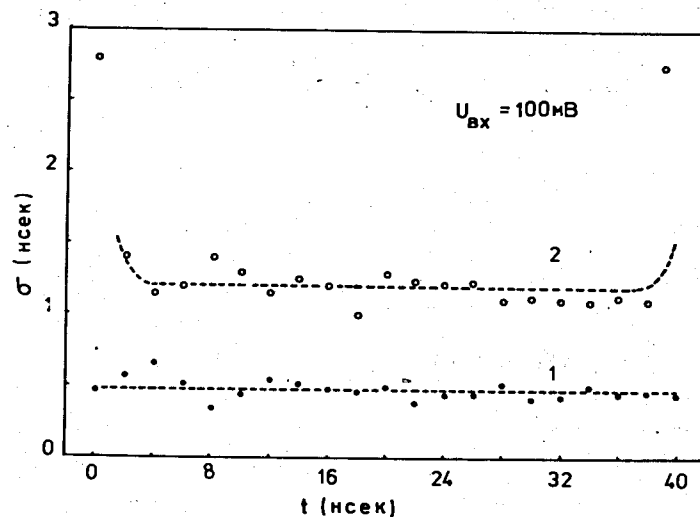


Рис. 6. Зависимость ошибок измерения времени от задержки входного импульса относительно фазы сдвига в активном линейном режиме: 1 - прямоугольный импульс, 2 - экспоненциальный импульс.

при линейном активном режиме работы МОП-транзистора. Ошибки измерения времени оценивались по формулам (4), (5), (6), (см. рис. 8). Измерения показывают, что при росте отношения  $\tau/T$  точность измерения времени улучшается, что объясняется большим количеством точек в регистрируемом распределении. Кроме того, наиболее оптимальным алгоритмом обработки является использование для оценки временного интервала формулы (5).

При оценке времени хранения, после записи входного сигнала в ПЗС-регистр, входной диод запирался прямоугольным импульсом (уровень TTL), по окончании которого измерялся полный заряд на выходе ПЗС. Исследования показали, что за время порядка 10мс. полный заряд практически не изменяется, что позволяет реализовать в системе с ПЗС-регистрами мультиплексирование каналов.

Таким образом, исследования, приведенные в работе показывают, что использование ПЗС-регистров совместно с FADC

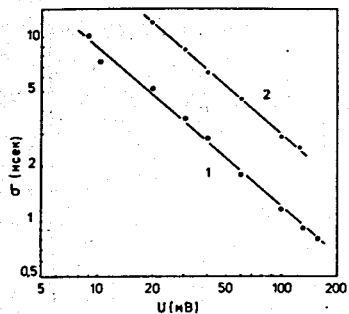


Рис. 7. Зависимость ошибок измерения времени от амплитуды экспоненциального импульса: 1 - частота сдвига 25 МГц, 2 - 12.5 МГц.

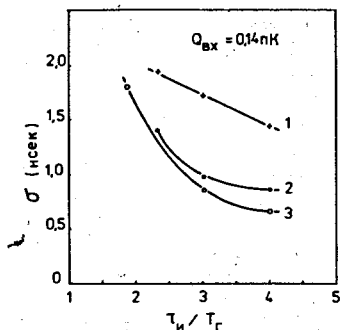


Рис. 8. Точность измерения времени при разной длительности входного импульса: 1 - формула (5), 2 - формула (4), 3 - формула (6).

в схемах регистрации информации из проволочных детекторов дает возможность реализовать по сравнению с пороговой электроникой следующие преимущества:

- высокую точность регистрации временных интервалов,
- измерение полного заряда в лавине, что позволяет оценивать  $dE/dx$  и проводить режекцию событий с  $\delta$ -электронами,
- иметь малую потребляемую мощность на канал,
- осуществлять мультиплексирование каналов электроники регистрации информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Charpak, G. Melchart, G. Petersen and F. Sauli, Nucl. Instr. & Meth. 167 ( 1979 ) p. 455
2. L.S. Barabash, A.M. Baranov, G.B. Bondarenko et al., Nucl. Instr. & Meth. A236 ( 1985 ) p. 271
3. W.B. Atwood, J. Carr, G. Chadwick et al., Nucl. Instr. & Meth. A252 ( 1986 ) p. 295
- H.M. Fisher, M. Hauschild, H. Hartmann et al., Nucl. Instr. & Meth. A252 ( 1986 ) p. 331

- H. Anderhub, H. Anders, S. Ansari et al., Nucl. Instr. & Meth. A252 ( 1986 ) p. 357
4. L.S. Barabash, E. Belcarz, Yu.B. Gurov et al., Nucl. Instr. & Meth. A288 ( 1990 ) p.375
5. H. Aihara, M. Alston-Garnjost, D.H. Badtke et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (1986)76,162
- T. Kamae, H. Aihara, R. Enomoto et al., Nucl. Instr. & Meth. A252 (1986)423
6. H. Anders, J. Feyt, E. Heijne et al., CERN/EF 85-10, 24 July 1985
7. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин, Полупроводниковые приборы с зарядовой связью, М., Советское радио, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел

13 ноября 1990 года.