



АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

КиҮі -- 88-33

Препринт КИЯИ-88-33

Н.А.Жук, Ю.Г.Здесенко, В.Н.Куп

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ  
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО  
СПЕКТРОМЕТРА

КИЕВ

Н.А.Жук., Ю.Г.Здесенко, В.Н.Кут

Прецизионный генератор импульсов для стабилизации  
полупроводникового спектрометра

Разработан генератор импульсов стабильной амплитуды, который состоит из источника постоянного напряжения, накопительного элемента и ключа на основе ртутного реле. Термостатированный источник обеспечивает нестабильность напряжения  $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  и менее  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  за 80 ч. Ртутное реле находится в отдельном термостате.

Нестабильность выходных импульсов генератора составляет  $1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  и менее  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$  за 24 ч.

The stable amplitude ~~imp~~ulse generator is worked out consisting of a constant voltage source, a storage element and a key based on mercury relay. The thermostating source provides the voltage unstability to  $12 \cdot 10^{-6}$  / degrees and less than  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  during 80 hours. The mercury relay is placed in a separate thermostat.

The unstability of generator output impulses is equal to  $1 \cdot 10^{-5}$  /degrees and less than  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$  during 24 hours.

The precision impulse generator for  
stabilization of a semiconductor spectrometer.

N.A. Zhuk, Yu.G.Zdesenko, V.N.Kuts.

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

Н.А.Жук, Ю.Г.Здесенко, В.Н.Кущ

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА

Киев, Институт ядерных исследований, 1988

Ключевые слова:

генераторы импульсов; источник питания; точность; электронные  
схемы; гамма-спектрометры;  $^{76}\text{Ge}$  - ПД; амплитуда;  
 $2\beta$  - распад;  $^{76}\text{Ge}$ ; реле.

pulse generators, power supplies, accuracy, electronic circuits,  
gamma spectrometers, ge-semiconductor detectors, amplitudes,  
double beta-decay, germanium-76, relays

С

Институт ядерных исследований АН УССР, 1988

Полупроводниковые детекторы (ПД) с успехом используются в исследованиях процессов  $2\beta$ -распада атомных ядер /1,2/. Так, наибольший предел периода полураспада  $^{76}\text{Ge}$  относительно безнейтринного  $2\beta$ -распада -  $5 \cdot 10^{23}$  лет установлен с помощью ПД из германия /2/. Этот выдающийся результат достигнут благодаря исключительной чистоте полупроводникового германия, что обуславливает отсутствие каких-либо радиоактивных примесей в детекторе, а также благодаря высокому энергетическому разрешению последнего (примерно 0,15% при энергии 1000 кэВ).

В экспериментах такого рода измеряется фоновый спектр ПД, хорошо защищенного от космического излучения и радиоактивности окружающей среды, с целью поиска пика безнейтринного  $2\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ , положение которого соответствует энергии  $2\beta$ -перехода  $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$  (2040,7 $\pm$ 0,5 кэВ), а полуширина определяется разрешением детектора. Поскольку продолжительность опытов по поиску  $2\beta$ -процессов достигает 10-20 тыс.ч /1,2/, достоверность получаемых результатов зависит в первую очередь от стабильности энергетической шкалы и разрешения спектрометра, которые должны поддерживаться на протяжении всего эксперимента с точностью 0,1-0,2 кэВ (относительная нестабильность менее  $5 \cdot 10^{-5}$ ). Это означает, что за 10 тыс. ч относительное среднеквадратичное отклонение положения в фоновом спектре какой-либо  $\gamma$ -линии (например, 2614 кэВ  $^{208}\text{Tl}$ ) не должно превышать  $(1-2) \cdot 10^{-5}$ , или 50 эВ по абсолютной величине.

В принципе, такие характеристики можно получить путем стабилизации спектрометра по  $\delta$ -пикам регистрируемого спектра, так как при этом обратная связь компенсирует любые флуктуации (температурные, временные, случайные) параметров детектора и электронного тракта, приводящие к изменению коэффициента преобразования. К сожалению, в низкофоновых измерениях этот метод неприменим из-за отсутствия в спектре пиков необходимой интенсивности.

В этом случае приходится стабилизировать не весь спектрометр в целом, а только электронный тракт (предусилитель, усилитель, аналого-цифровой преобразователь), используя генератор импульсов стабильной амплитуды (ГИСА) в качестве источника реперных (опорных) сигналов. Однако современные генераторы не обладают требуемой долговременной стабильностью - у лучшего из известных ГИСА нестабильность выходных импульсов гарантируется на уровне  $10^{-5}$  только в течение 24 ч /3,4/. Кроме того, возникает проблема постоянства характеристики полупроводникового кристалла. Действительно, собственная температурная нестабильность амплитуды ППД равна  $1,7 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  /5/. С помощью криостата обычной конструкции и путем термостатирования установки можно понизить эту величину примерно на два порядка. Однако нельзя полностью исключить существование временных (возможно, очень медленных) изменений амплитуды сигналов ППД, вызываемых, например, "старением" кристалла или ухудшением свойств контакта для съема сигналов.

Единственная возможность преодоления этих трудностей состоит в регулярной калибровке энергетической шкалы спектрометра с помощью  $\delta$ -источников, а затем в корректировке обнаруженных отклонений при обработке спектров на ЭВМ. В качестве калибровочных могут быть использованы не только  $\delta$ -пики от внешних источников, периодически вводимых в установку, но и сравнительно интенсивные фоновые пики (например,  $1461 \text{ кэВ } ^{40}\text{K}$ ), которые накапливаются в спектре за время между калибровками.

Таким образом, задача обеспечения стабильности спектрометра в течение всего эксперимента (10 тыс. ч) упрощается и сводится к поддержанию требуемых параметров в отдельных измерениях, длительность которых определяется периодичностью калибровок и может быть установлена (в зависимости от характеристик ППД и ГИСА) в пределах от 10 до 100 ч.

Однако, доступные промышленные ГИСА (например, БГА2-97 или  $N\bar{Z}$ -635/С) не удовлетворяют и этим облегченным требованиям и стабильности амплитуды импульсов - временной дрейф выхода БГА2-97 за 8 ч составляет  $3 \cdot 10^{-4}$ , а для  $N\bar{Z}$ -635/С -  $5 \cdot 10^{-5}$ . В связи с этим настоящая работа посвящена разработке и созданию ГИСА для стабилизации низкофонового полупроводникового спектрометра, используемого в исследованиях  $\beta\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$  /6/.

### Описание генератора

Структурная схема генератора импульсов стабильной амплитуды показана на рис. 1. Он построен по традиционной схеме /3/ и состоит из источника стабильного напряжения (ИСН), ключа перекидного типа на основе ртутного контактрона (РК), накопительного конденсатора (С) и выходного аттенюатора на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_n$ .

Поскольку характеристики ГИСА в значительной степени определяются свойствами коммутирующего элемента, в качестве последнего были испытаны несколько разновидностей ртутных реле отечественного и зарубежного производства. Наилучшие результаты получены с контактроном типа НГ12МГ-542И. К подвижному контакту реле подключен накопительный конденсатор (2 мкф), который в одном положении заряжается от источника стабильного напряжения, а в другом разряжается через аттенюатор. При этом в резисторе нагрузки  $R_n$  формируется импульс с крутым фронтом ( $\sim 10$  нс) и экспоненциальным спадом с постоянной времени 100 мкс. Сопротивление изоляции высокостабильного накопительного конденсатора составляет  $10^{10}$  Ом, благодаря чему относительный саморазряд за время перелета контакта (0,2 мс) не превышает  $10^{-8}$ . Ртутный контактрон и прецизионные резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  помещены в термостат, поддерживающий постоянную температуру с точностью 0,05°C при изменении температуры окружающей среды от 10 до 35°C. Схема запуска ртутного реле, которая состоит из двухполярного ограничителя (на стабилитронах) амплитуды синусоидального напряжения сети на уровне  $\pm 10$  В и сглаживающего фильтра, эффективно уменьшает влияние колебаний напряжения сети на амплитуду выходных импульсов генератора. Дополнительной мерой, повышающей стабильность ГИСА, является исключение любых механических кон-

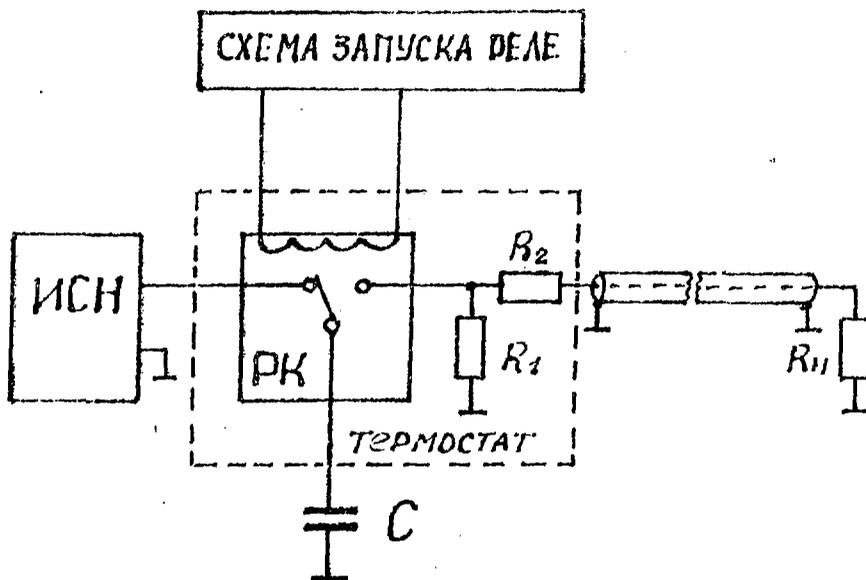


Рис. 1. Структурная схема ТРСА

тактов на пути передачи сигналов от ртутного реле к сопротивлению нагрузки  $R_n$ , расположенному в предусилителе. С этой целью все соединения в этой цепи выполнены с помощью пайки без применения переключателей и разъемов.

### Источник стабильного напряжения

Принципиальная схема ИСН приведена на рис. 2. Применен стабилизатор последовательного типа с регулирующим элементом на транзисторе  $\text{VT6}$ . В качестве усилителя рассогласования использован операционный усилитель 153 УД 5А (ДА4) с коэффициентом усиления  $10^6$ , что обеспечивает необходимую глубину обратной связи. Паспортное значение напряжения смещения нуля у микросхемы 153УД5А отражает симметричность входного каскада усилителя и не превышает 1 мВ при температурном дрейфе  $5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ . Стабильность ИСН в основном определяется стабильностью опорного напряжения, поступающего на прямой вход усилителя рассогласования. В источнике применена мостовая схема [7] формирования тока ( $\text{VT5}$ , ДАЗ) опорного элемента  $\text{VD7}$  (стабилитрон КС 191 Ф с собственной температурной нестабильностью  $5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ). Операционный усилитель ДА4 и источник опорного напряжения помещены в отдельный термостат, аналогичный по конструкции и характеристикам термостату для ртутного реле. На элементах  $\text{VT1-VT4}$  и ДА1, ДА2 собран источник напряжения  $\pm 12 \text{ В}$ , от которого запитаны прецизионный стабилизатор и схемы управления термостатами.

Методика проверки стабильности источника основана на измерении цифровым вольтметром В7-21 разности напряжения нормального элемента (1,018 В) и выходного напряжения ИСН, подобранного с помощью прецизионного термостатированного делителя таким образом, что эта разность не превышает 10 мВ. Разрешающая способность В7-21 (1 мкВ на пределе 10 мВ) и класс точности 0,001 термостатированного нормального элемента типа Х-483/1 позволяют получить относительную точность измерений  $\pm 10^{-6}$ . Для проведения испытаний ИСН целиком помещался в термостат с регулируемой температурой в интервале  $25-35^\circ\text{C}$ .

Характеристики ИСН:

- выходное напряжение ( $I_{\text{в}}$ )	-	$9,1 \text{ В} \pm 5\%$ ;
- относительное изменение $I_{\text{в}}$ при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ , не более	-	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ ;

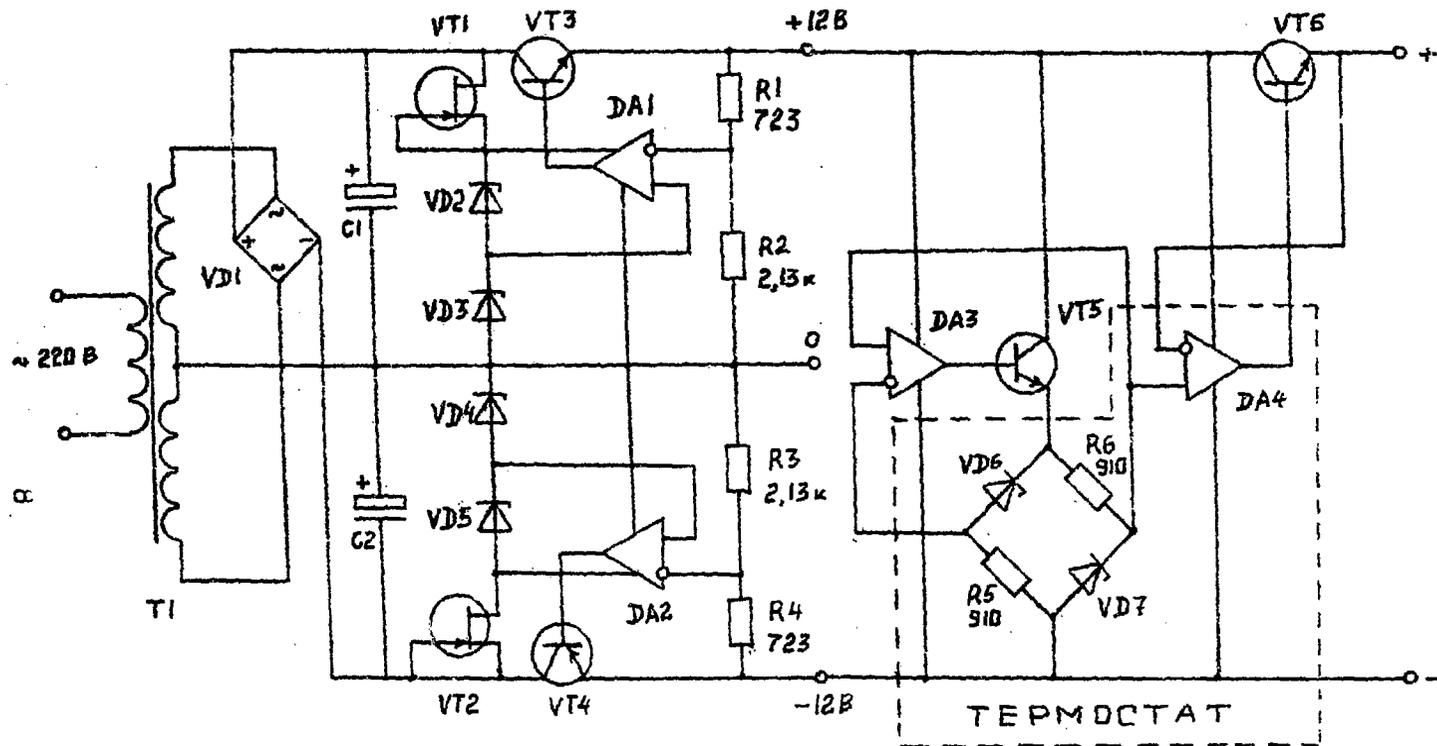


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема источника постоянного напряжения.  
 (VT1, VT2 - КП307 Ж; VT3, VT6 - КТ 815 Г; VT4 - КТ 814 В; VT5 - КТ 315 Г;  
 VD1 - КД 405В; VD2...VD7 - КС 191 Ф; DA1...DA3 - 140 УД 6А; DA4 - 153 УД 5А)

- относительная температурная нестабильность  $U_B$   
(измерена в диапазоне 25-35°C) -  $+(1-2) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .
- относительное среднеквадратичное отклонение  $U_B$   
за 80 ч при постоянной температуре и напряжении  
сети -  $\pm(3-5) \cdot 10^{-6}$ .

### Испытания ГИСА

Измерение собственных характеристик ГИСА представляет определенные трудности из-за отсутствия эталонных генераторов с необходимым классом точности. Поэтому в данной работе использован метод сравнения амплитуды импульсов ГИСА, поступающих на вход предусилителя полупроводникового спектрометра, с амплитудой сигналов ППД от моноэнергетических  $\gamma$ -квантов:

Установка для измерения параметров ГИСА состоит из  $\text{Ge(Li)}$  ППД типа ДГДК-40А, спектрометрического тракта и многоканального анализатора импульсов АИ-4096-А90. В процессе испытаний детектор постоянно облучался  $\gamma$ -квантами с энергиями 662, 1172 и 1332 кэВ от источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Генератор устанавливался в термостате с диапазоном регулирования 25-35°C. Импульсы ГИСА подавались на вход предусилителя через специальный высокостабильный конденсатор, причем амплитуда их подбиралась с помощью аттенюатора таким образом, что генераторный пик находился в измеряемом спектре между  $\gamma$ -пиками  $^{60}\text{Co}$ . Набор статистики продолжался 10 мин, в течение которых характеристики генератора можно считать постоянными, а сами измерения многократно повторялись через заданный промежуток времени. Обработка спектров проводилась с помощью ЭВМ /В/ и заключалась в определении положений центров тяжести всех пиков, построении линейной калибровочной зависимости по  $\gamma$ -пикам с энергией 662 и 1333 кэВ и в вычислении по этой зависимости энергетического эквивалента положения генераторного пика, а также  $\gamma$ -пика 1172 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . Такой подход позволяет компенсировать нестабильности тракта усиления и преобразования сигналов. Погрешность методики контролировалась по положению  $\gamma$ -пика 1172 кэВ, относительные среднеквадратичные флуктуации которого были не более  $2 \cdot 10^{-5}$  во всех измерениях.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные при испытаниях двух образцов ГИСА на временную стабильность.

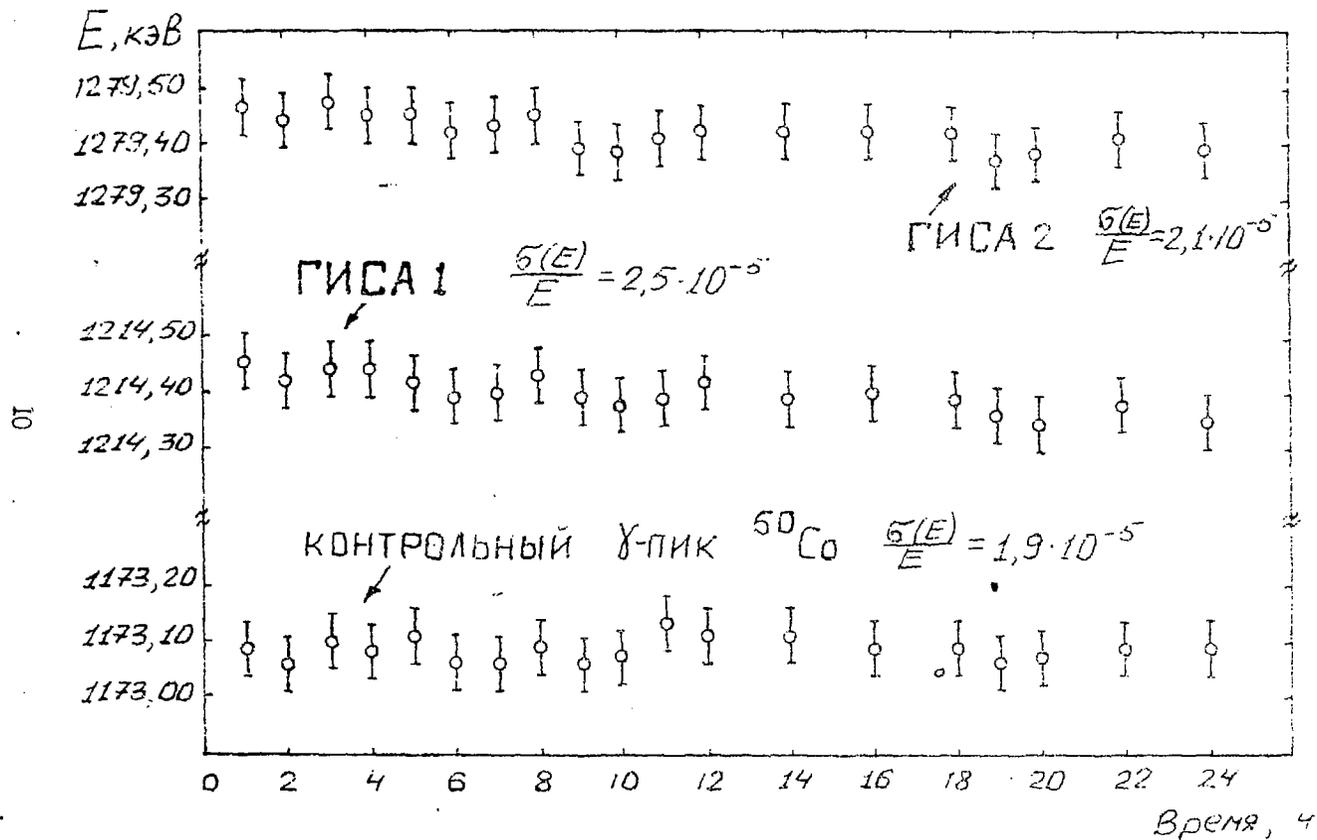


Рис. 3. Результаты испытаний ГИСА на временную стабильность

За 24 ч среднеквадратичное отклонение пика одного генератора составляет  $\pm 2,1 \cdot 10^{-5}$ , а второго -  $\pm 2,5 \cdot 10^{-5}$ . Поскольку за это же время разброс положения контрольного пика  $^{60}\text{Co}$  равен  $\pm 1,9 \cdot 10^{-5}$ , из результатов следует, что собственная временная нестабильность ГИСА за 24 ч не превышает  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ .

Характеристики разработанного ГИСА, а также некоторых генераторов промышленного изготовления приведены в таблице.

Таким образом, созданный ГИСА по своей стабильности превосходит промышленные генераторы ВГА2-97, №-635/С и сравним с генератором фирмы "ORTEC" (тип 448) /3/, что позволяет использовать его в исследованиях  $^{23}\text{Th}$ -распада атомных ядер для стабилизации низкофонового полупроводникового спектрометра.

Характеристики разработанного и промышленных ГИСА

Генератор, страна	Амплитуда выходного импульса, В	Частота следования импульсов, Гц	Относительная нестабильность амплитуды импульса			
			при изменен. температуры	при изменен. напряжения сети на $\pm 10\%$	временная при постоян. температуре и напряжен. сети	
					за 8 ч	за 24 ч
БГА2-97, (СССР)	0 - +0,5	100	$\pm 5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 7 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$	-
	0 - +0,5	100	(10-50 $^{\circ}\text{C}$ )			
NЭ-635/С (ВНР)	0 - $\pm 15$	50	$\pm 5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	$\leq 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	-
	0 - $\pm 10$		(15-40 $^{\circ}\text{C}$ )			
"ОРТЕС" тип 448, (США)	0 - $\pm 10$	1; 2; 5; 10; 20; 50; 100	$\pm 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (15-40 $^{\circ}\text{C}$ )	$\leq 10^{-5}$	-	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
Разработанный ГИСА	0 - $\pm 9$	50; 100	$10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (25-35 $^{\circ}\text{C}$ )	$\leq 10^{-5}$	-	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$

## Список использованной литературы

1. Alessandrello A., Bellotti E., Cattadori G. et al. Underground laboratory and Milano double beta decay experiment. - *Nucl. Instrum. and Methods*, 1986, v. B17, p. 411-417.
2. Caldwell D.O., Eisberg R.M., Grumm D.M. et al. Limits on neutrinoless  $\beta\beta$  decay including that with majoron emission. - *Phys. Rev. Lett.*, 1987, v. 59, N 4, p. 419-422.
3. Мелешко Е.А., Митин А.А. Измерительные генераторы в ядерной электронике. М.: Атомиздат, 1981, 256 с.
4. Catalog 1004 ORTEC Incorporated. Radiation spectroscopy and analysis instruments for research and industry, 1976, 290 p.
5. Pehl R.H., Goulding F.S. et al. Accurate determination of the ionization energy in semiconductor detector. - *Nucl. Instrum. and Methods*, 1968, v. 59, N 1, p. 45-55.
6. Здесенко Д.Г., Кропивянский В.Н., Куц В.Н. и др. Результаты подземного эксперимента по поиску безнейтринного двойного  $\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ . - *Ядерная физика*, 1986, т. 43, в. 5, с. 1065-1073.
7. Алимов Г.Р., Ирханов Б.Г., Лустов Н.М., Семенов В.Ю. Прецизионный стабилизатор напряжения с мостовой схемой формирования тока опорного элемента. - *Сообщения ОИЯИ*, P10-85-798, Дубна, 1985, 5с.
8. Гарькуша Г.Н., Здесенко Д.Г., Куц В.Н., Третяк В.И. Система накопления и обработки спектрометрической информации в низкофоновых экспериментах. - *Препринт ИЯИ-86-4*, Киев, 1986, 12 с.

Николай Андреевич Кук  
Дрий Георгиевич Здесенко  
Василий Николаевич Куц

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА  
(препринт ИЯИ-88-33)

Редакторы: Л.П.Малашкина  
Н.А.Солдатенко

Подписано к печати 21.06.88 г.

БФ № 24622	Бумага офсетная	Усл.-печ.л. - 0,85
Изд. ИЯИ-88-33	Печать офсетная	Уч.-изд.л. - 3,4
Тип.зак. 203	Формат бумаги 60x90/16	
Тираж 200 экз.	Цена 3 коп.	

---

СКТБ с ЭИ Института ядерных исследований АН УССР  
252026, Киев-28, проспект Науки, 47

---