

УДК 681.3
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МДП-СТРУКТУРЫ

Д. А. Ташлинцев¹, В. М. Чайковский²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ radiolokaci@yandex.ru, ² rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информативность комплекса для измерения параметров МДП-структуры может быть повышена за счет использования в его конфигурации генератора линейного изменяющегося напряжения (ГЛИН), реализованного на базе микроконтроллера. *Материалы и методы.* Используется метод «малого» сигнала, предназначенного для анализа нелинейных электрических систем, представляющих собой полупроводниковые структуры, и используемого для моделирования передаточной функции и описания отклика таких систем при «малых» значениях амплитуды измерительного сигнала, подаваемого на вход системы, позволяет оценить отклик системы с полупроводниковой структурой типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и зафиксировать ее C–V-характеристики. *Результаты.* Добавление в состав ГЛИН микроконтроллера дает возможность реализовать универсальный исследовательский комплекс, более тщательно оценивающий характеристики МДП-структуры, с различными по толщине слоями диэлектрика, как с тонким, так и со значительно увеличенным. *Выводы.* Включение в состав ГЛИН микроконтроллера, выполняющего одновременно операции: запоминания, хранения и вычисления, обеспечивает оценку значения зарядовой неустойчивости МДП-структуры, что наряду со значительным расширением объема получаемой информации также позволяет оценивать реакцию МДП-структуры, находящейся в различных энергетических состояниях, на внешнее воздействие «малым» сигналом.

Ключевые слова: энергетические состояния, гистерезис, поляризационные свойства, МДП-структуры, микроконтроллер, вольт-фарадная зависимость, диэлектрический слой

Для цитирования: Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Измерение зарядовой неустойчивости МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 17–24. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

MEASUREMENT OF CHARGE INSTABILITY OF TIR STRUCTURE

D.A. Tashlintsev¹, V.M. Tchaikovsky²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ radiolokaci@yandex.ru, ² rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The information content of the complex for measuring the parameters of the TIR structure can be increased by using a GLIN implemented on the basis of a microcontroller in its configuration. *Materials and methods.* The method of a "small" signal is used, designed for the analysis of nonlinear electrical systems representing semiconductor structures, and used to model the transfer function and describe the response of such systems at "small" values of the amplitude of the measuring signal supplied to the input of the system. This approach allows us to evaluate the response of a system with a semiconductor, which is a metal-dielectric-semiconductor (MDP) structure, and fix the C-V characteristics of this structure. *Results.* The addition of a microcontroller to the GLIN makes it possible to implement a universal research complex that can assess in more detail the characteristics of a TIR structure with dielectric layers of various thicknesses, both thin and significantly enlarged. *Conclusions.* The use of a microcontroller in GLIN, capable, along with the operations of memorization and storage, to perform the computational ones necessary for the final assessment of the charge instability of the TIR structure, not only expands the amount of information received, but also allows us to evaluate the reaction of the investigated TIR structure, located in various energy states, to the external influence of a "small" signal.

Keywords: energy states, hysteresis, polarization properties, TIR structures, microcontroller, volt-farad dependence, thick dielectric layer

For citation: Tashlintsev D.A., Tchaikovsky V.M. Measurement of charge instability of TIR structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):17–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

Метод «малого» сигнала – это метод, предназначенный для анализа нелинейных электрических объектов, которым является полупроводниковая структура, и он применяется для моделирования передаточной функции и описания реакции такого объекта при условии «малых» значений амплитуды сигнала (20 мВ), действующего на входе измерительной системы, содержащей такой нелинейный объект. Данный подход используется для оценки реакции системы с полупроводником, когда последний будет являться структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1, 2], итогом чего, как правило, является получение характеристики графом $C-V$ характеристик структуры.

В результате продолжительного по времени воздействия на МДП-структуру вместо напряжения смещения с изменяющимся значением амплитуды, постоянным, с неизменным значением амплитуды, в структуре будет проявляться эффект зарядовой нестабильности, вызывающий появление в ее диэлектрическом слое встроенного заряда. А это изменит такую важную характеристику структуры, как уровень порогового напряжения, вызывающего у структуры диэлектрический пробой [3, 4]. Последнее вызвано увеличением уровня напряженности электрического поля из-за высокого уровня амплитуды напряжения смещения, прикладываемого к структуре, что вызывает усиленное проявление поляризационного эффекта в материале ее диэлектрического слоя, приводящего к объемному перераспределению внутрисистемных зарядов, но так же и изменением температурного режима внешней среды. Возникновение данной нестабильности вызывает не только смещение получаемых вольт-фарадных характеристик, но также может привести к искажению формы последних, иными словами данная нестабильность является показателем ряда возникающих вероятных угроз при дальнейшем использовании МДП-структур, особенно в случае, когда на их базе ведется разработка высокоточной и надежной техники с продолжительным сроком службы. Подробный анализ с позиции физики твердого тела, с указанием причин и других различных механизмов, вызывающих возникновение указанной нестабильности, рассмотрен в работе [4].

Проявление эффекта зарядовой нестабильности наглядно поясняется вольт-фарадными характеристиками на рис. 1.

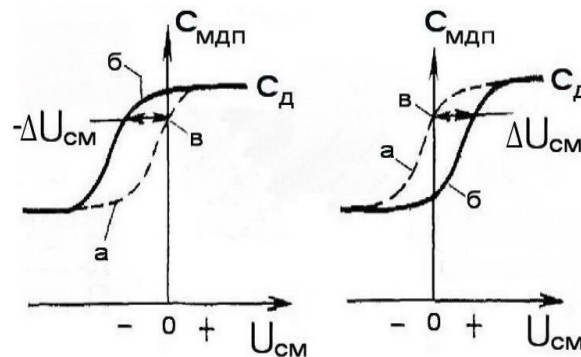


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики

Изменение значения полной емкости МДП-структуры от напряжения смещения, т.е. вольт-фарадная характеристика структуры при плавной смене ее энергетического состояния от «инверсии» на состояние «обогащения», где а – исходные, начальные зависимости, до начала длительного воздействия постоянным напряжением на исследуемую МДП-структуру; б – зависимости, после устранения упомянутого воздействия той или иной полярности на структуру, соответственно, а и б; в – точка выбора частичного значения (0,5 или 0,7) от максимального, т.е. полной емкости структуры, равного емкости диэлектрического слоя C_D при нахождении структуры в состоянии «обогащения».

Устранение указанной проблемы может быть достигнуто использованием различных методов, осуществляющих усовершенствование технологий производства структур металл-диэлектрик-полупроводник, заключающихся в добавлении в слой диэлектрика методом легирования или инжестирования определенных материалов (Na, K, Li). Последние могут быть в виде их заряженных ионов, вводимых непосредственно в формируемый слой диэлектрика [3, 4], получаемый в большинстве случаев методом термического окисления поверхности полупроводникового слоя, в результате чего в большинстве случаев диэлектрик представляет собой двуокись кремния [1, 2].

Оценка характера изменения значения общей емкости структуры $C_{\text{мдп}}$, фиксируемого характерографом в виде вольт-фарадной характеристики, осуществляется с помощью любой измерительной схемы, входящей в состав того или иного измерителя, подробно рассмотренных в работе [5].

Специфику предлагаемому ГЛИН придает реализация его на основе микроконтроллера PIC 18F6 (МЧ) [6–8]. Оценка значения зарядовой неустойчивости с помощью предлагаемого ГЛИН происходит согласно следующему алгоритму (рис. 2). Нажатием кнопки 1 на микроконтроллер подается питание. Затем кнопками 2–8 вводится значение частоты повторения напряжения генератора, значение которой отображается светодиодами 0–3.

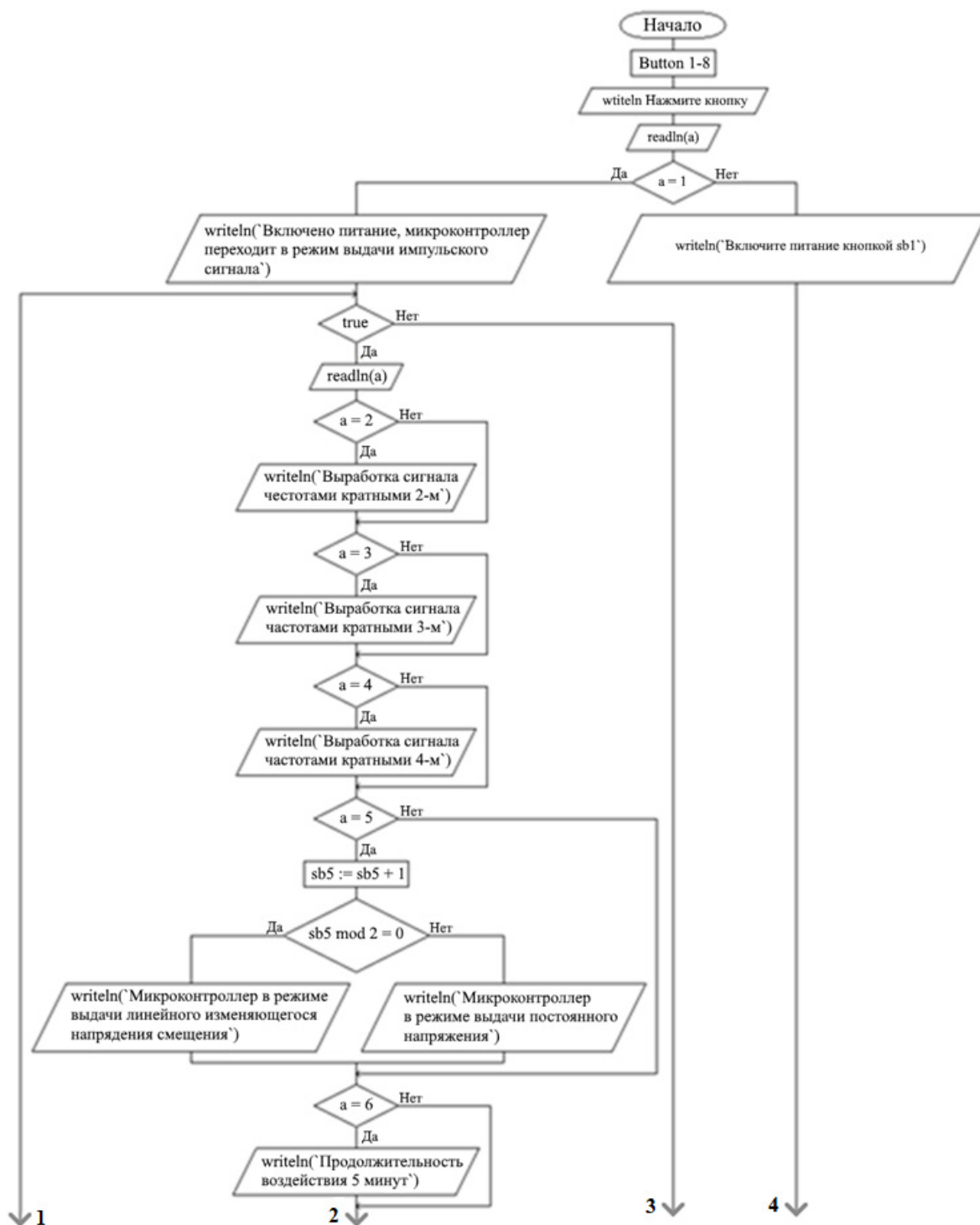


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера

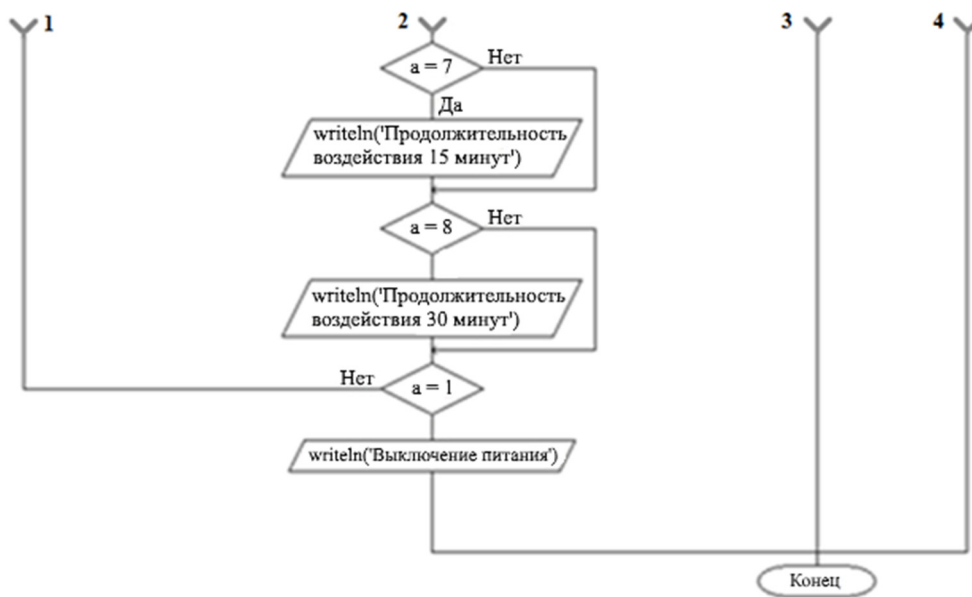
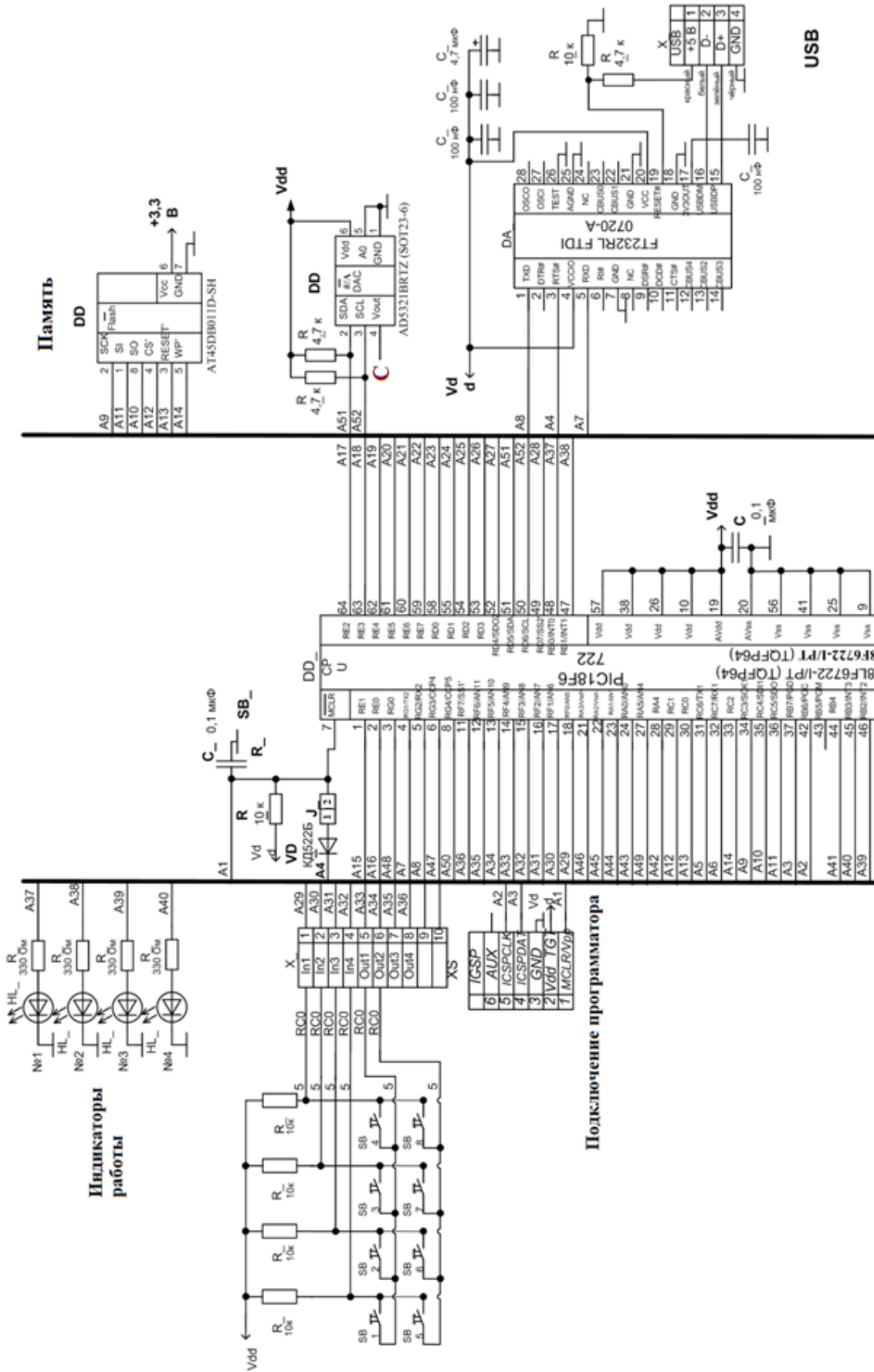


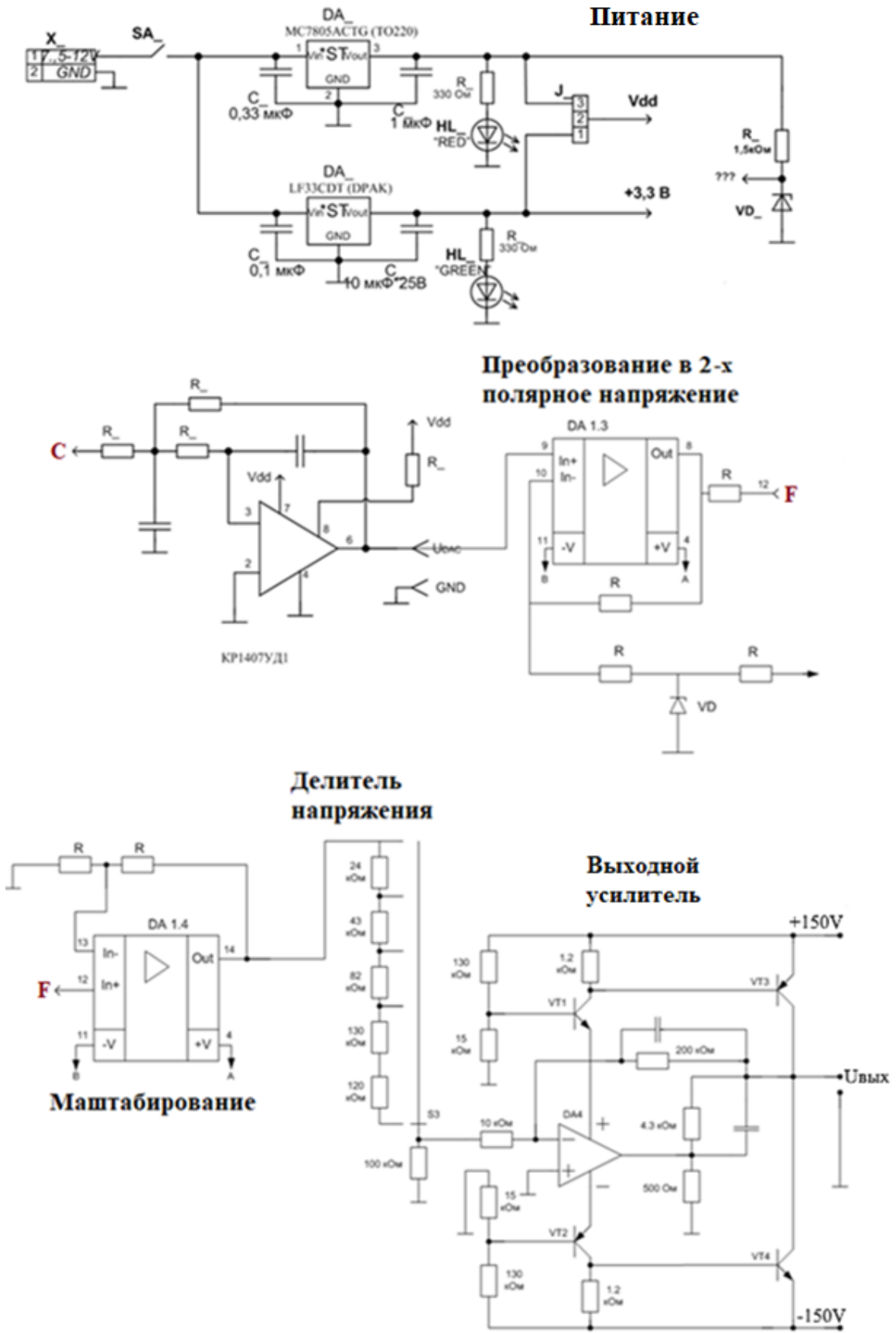
Рис. 2. Окончание

Продолжительность воздействия на МДП-структуру постоянным, с неизменной амплитудой напряжением смещения задается клавиатурой. При нажатии кнопки 6 таймер устанавливается на 5 мин, кнопки 7 на 15 мин, кнопки 8 на 30 мин. При нажатии кнопки 5 устанавливается таймер в соответствии с предыдущей нажатой кнопкой. Отмена режима выдачи постоянного напряжения осуществляется повторным нажатием кнопки 5. Далее очищается регистр от предыдущих значений, установленных кнопками 1–8, при этом загорается светодиод 1, показывающий, что ГЛИН переходит в режим продолжительного по времени формирования неизменного по амплитуде напряжения смещения. Если кнопки 1–5 были нажаты, то происходит обработка выходного сигнала измерительной схемы, преобразующей параметры МДП структуры, и далее идет завершение работы программы. Выключение МК производится повторным нажатием кнопки 1. При нажатии кнопки К5 с помощью одного из измерителей [5] фиксируется вольт-фарадная характеристика МДП-структуры типа $C_{мдп} = f(U_{см})$, отражающая переход структуры из области глубокой «инверсии» в область «обогащения», с последующей подачей напряжения пропорционального $C_{мдп}$ на вход А15 (рис. 3). После завершения этапа перехода, нажатием кнопки А11 будет занесено в память (рис. 3) значение выбранного уровня от максимального значения $C_{мдп}$, соответствующее выбранной точке «в» (рис. 1). Потом осуществляется продолжительное воздействие на МДП-структуру напряжением постоянного тока с фиксированным повышенным значением амплитуды напряжения, что приводит к образованию в ее диэлектрическом слое встроенного заряда, вызывающего заметный сдвиг $\Delta U_{см}$ по координате действующего напряжения смещения регистрируемой характеристикографом $C-V$ -характеристики. На следующем этапе путем повторного нажатия кнопки К5 происходит перевод режима работы ГЛИН в обычный режим, а именно, в режим формирования изменяющегося напряжения смещения. Затем происходит повторный процесс получения $C-V$ -характеристики, в ходе которого путем сравнения текущего значения напряжения пропорционального $C_{мдп}$ со значением, ранее сохраненным в регистре – $W_{МК}$ и соответствующим точке «в» (см. рис. 1). В момент равенства последних происходит фиксация значения напряжения $U_{см}$, соответствующего данному моменту равенства, которое затем сравнивается со значением напряжения смещения, соответствующего точке «в» (см. рис. 1) на предыдущем этапе измерения. Оценка значения зарядовой нестабильности происходит путем перевода ГЛИН в режим продолжительного по времени (от нескольких десятков минут до нескольких сотен) формирования с неизменным выбранным значением амплитуды с тем или иным видом полярности. В результате проведения на предварительном этапе теоретического анализа выбираются: максимальное значение амплитуды постоянного напряжения, знак его полярности и продолжительность интервала воздействия на структуру. Методика получения окончательного численного значения зарядовой нестабильности исследуемой МДП-структуры, полученного в ходе проведенного измерения, достаточно подробно изложена в работе [5].



a)

Рис. 3. Принципиальная схема ГЛИН



б)

Рис. 3. Окончание

С помощью кнопок К2–К4 (рис. 3) устанавливается необходимая скорость изменения амплитуды напряжения смещения, последнее достигается путем увеличения частоты повторения

сигнала опорного генератора в $2 \div 4$ раза. Остановка работы ГЛИН выполняется двойным нажатием кнопки К1, при этом прекращается свечение индикатора «РАБОТА». При этом также исключается подача исходного импульсного сигнала, который используется в дальнейшем для формирования измерительного сигнала «малой амплитуды», воздействующего на МДП-структуру, помещенную с помощью зондового устройства в состав измерительной схемы измерительного устройства [5]. Структура последней в силу ограниченности объема статьи не приводится. Исходное напряжение для ГЛИН, являющееся, по сути, опорным, из которого будет формироваться во встроенном в состав МП ЦАП в напряжение в виде импульсной последовательности прямоугольной формы. При этом изменение амплитуды значения данного напряжения будет лежать в диапазоне от нуля до +2,4 В, для расширения границ данного диапазона с придачей напряжению двухполярного характера изменения используется высоковольтный выходной каскад, включающий высоковольтные разнополярные транзисторы VT3 и VT4 типа КТ886А1 и КТ886Б1. Последнее позволяет формировать на выходе данного ГЛИН напряжение с амплитудой, изменяющейся в диапазоне ± 100 вольт, что дает возможность исследовать структуры с толстым диэлектрическим слоем.

Использование в составе ГЛИН микроконтроллера, способного выполнять вычислительные операции, необходимые для окончательной оценки зарядовой нестабильности МДП-структуры, не только расширяет объем получаемой информации, но и придает предлагаемому ГЛИН дополнительные возможности, позволяющие оценить реакцию исследуемой МДП-структуры, находящуюся в различных энергетических состояниях.

Включение в состав ГЛИН микроконтроллера дает возможность на базе данного ГЛИН совместно с измерителем, описанным в работе [5], реализовать универсальный исследовательский комплекс, позволяющий оценить свойства целого класса МДП-структур, обладающих различными по толщине слоями диэлектрика, как тонкими, так и значительно увеличенными.

Использование в предлагаемом ГЛИН подхода, основанного на замене процесса запоминания и относительно длительного хранения аналоговых величин, которыми являются несколько значений напряжения смещения, на операцию хранения кодов пропорциональных этим значениям полностью исключает всякие ограничения по продолжительности процесса измерения, который может достигать нескольких часов.

Список литературы

1. Овсюк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск : Наука, 2014. 254 с.
2. Berman A. Model of highfrequency capacity MOS – the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer // *Solid State Electron*. 1974. Vol. 17, № 7. P. 735–742.
3. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
4. Андреев В. В., Барышев В. Г., Столяров А. А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник : монография. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 256 с.
5. Андреев В. В., Барышев В. Г., Бондаренко Г. Г. [и др.]. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки // *Микроэлектроника*. 2000. Т. 29, № 2. С. 105–112.
6. Никонова А. А., Небеснюк О. Ю. [и др.]. Исследование механизмов нестабильности характеристик МДП структур // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2011. № 1. 3 с.
7. Чайковский В. М. Измерители параметров МДП-структур на несинусоидальном токе : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1996. 222 с.
8. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVP : пер. с англ. А. В. Евстифеева. М., 2023. 273 с.

References

1. Ovsyuk V.N. *Elektronnyye protsessy v poluprovodnikakh s oblastyami prostranstvennogo zaryada = Electronic processes in semiconductors with spatial charge regions*. Novosibirsk: Nauka, 2014:254. (In Russ.)
2. Berman A. Model of highfrequency capacity MOS – the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer. *Solid State Electron*. 1974;17(7):735–742.
3. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : textbook*. Moscow, 2005:492. (In Russ.)
4. Andreev V.V., Baryshev V.G., Stolyarov A.A. *Inzheksionnyye metody issledovaniya i kontrolya struktur metall-dielektrik-poluprovodnik: monografiya = Injection methods of research and control of metal-dielectric-semiconductor structures : monograph*. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Baumana, 2004:256. (In Russ.)

5. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G. et al. Investigation of charge degradation of TIR structures in strong electric fields by the method of controlled current load. *Mikroelektronika = Microelectronics*. 2000;29(2):105–112. (In Russ.)
6. Nikonova A.A., Nebesnyuk O.Yu. et al. Investigation of mechanisms of instability of characteristics of TIR structures. *Radioelektronika, informatika, upravlenie = Radioelectronics, informatics, management*. 2011; (1):3. (In Russ.)
7. Chaykovskiy V.M. Meters of parameters of TIR structures on non-sinusoidal current: PhD dissertation. Penza, 1996:222. (In Russ.)
8. Morton Dzh. *Mikrokontrollery AVP: per. s angl. A.V. Evstifeeva = AVP microcontrollers : translated from English by A. V. Evstifeev*. Moscow, 2023:273. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Ташлинцев

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

Dmitry A. Tashlintsev

Engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Victor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 15.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 14.06.2024

Принята к публикации / Accepted 05.07.2024