

УДК 621.382

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ

© 2020 г. Д. С. Гаев^а, С. Ш. Рехвиашвили^{б, *}

^аКабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, 360004 КБР

^бИнститут прикладной математики и автоматизации КБНЦ Российской АН,
ул. Шортанова, 89А, г. Нальчик, 360000 КБР

*e-mail: rsergo@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2020 г.

После доработки 30.04.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Предлагается конструкция однокристалльного формирователя импульсов и сигналов специальной формы. Принцип работы прибора основан на инжекции носителей заряда в канал планарной кремниевой структуры из эмиттеров, которые расположены на разных расстояниях от коллекторного контакта. Форма выходного сигнала определяется расположением эмиттеров и временем жизни или подвижностью носителей заряда. Разработана теоретическая модель прибора, проведены численные расчеты и экспериментальные исследования. Формирователь импульсов может использоваться в качестве умножителя частоты, в технике шумоподобных сигналов, для кодирования сигналов, а также в различных охранных системах.

Ключевые слова: функциональная микроэлектроника, инжекция, диффузионно-дрейфовый транспорт, время жизни, подвижность, умножитель частоты, генератор специальной формы сигналов, шумоподобные сигналы, кодирование сигналов

DOI: 10.31857/S0544126920060058

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное развитие технологий и методов конструирования в микро- и нанoeлектронике приводит к появлению новых приборов и систем для аналоговой, цифровой и смешанной обработки сигналов. Наиболее перспективным направлением до сих пор считается функциональная микроэлектроника [1–3], сущность которой заключается в поисках и использовании различных физических явлений в конденсированных средах для создания на их основе качественно новой элементной базы. К устройствам функциональной микроэлектроники традиционно относятся приборы с зарядовой связью, оптоэлектронные и акустоэлектронные приборы, диод Ганна и лавинно-пролетный диод и др. Функциональная микроэлектроника в определенном смысле может включать в себя также микро электромеханические системы (МЭМС) [4], элементную базу квантовых информационных технологий [5] и различные квантово-размерные структуры [3].

В настоящей работе предлагается новый элемент функциональной микроэлектроники – однокристалльный формирователь импульсов. Действие прибора основано на процессах одновре-

менной инжекции из нескольких эмиттеров и диффузионно-дрейфовом переносе носителей заряда во внешнем электрическом поле. Расположение эмиттеров на поверхности и электрофизические параметры полупроводника определяют форму и предельную частоту выходного переменного сигнала.

Укажем на возможные области применения предлагаемого прибора. В самом простом случае он может выполнять функцию умножителя частоты, который позволит уменьшить частоту задающего генератора и тем самым повысить его стабильность. Другая очень важная область – это разработка элементной базы для технологии шумоподобных сигналов (ШПС) [6]. Здесь прибор может использоваться для осуществления дополнительной модуляции несущих электромагнитных колебаний и расширения спектра сигналов радиосвязи. Эффективная демодуляция таких сигналов в приемном тракте возможна только с применением аналогичного прибора с известными характеристиками. Помимо этого, с помощью прибора можно создавать определенную синхронизирующую последовательность и передавать ее вместе с информационными сигналами в общей

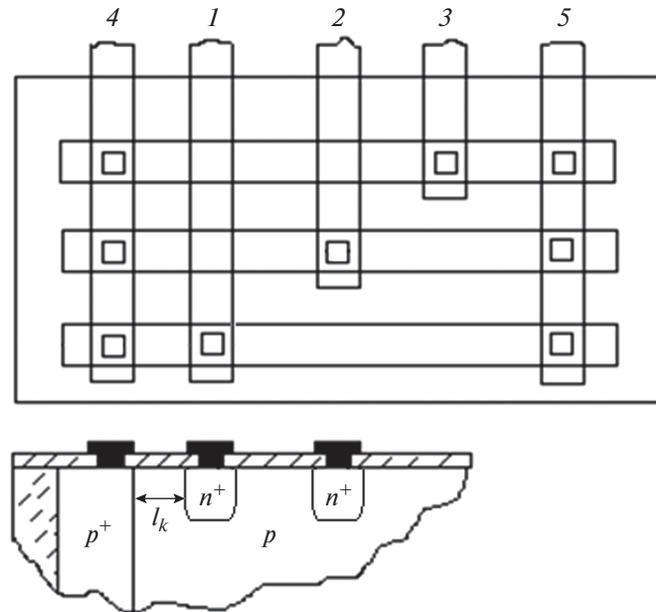


Рис. 1. Типовая структура инжекционного диффузионно-дрейфового формирователя импульсов: эмиттерные шины 1–3; коллекторные шины 4, 5.

полосе канала связи. Наконец отметим, что многообещающими выглядят перспективы применения нового прибора для цифрового кодирования сигналов [7], а также в системах контроля и управления доступом (СКУД) [8].

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ

Инжекционный диффузионно-дрейфовый формирователь импульсов представляет собой планарную кремниевую структуру с двумя коллекторными контактами и множеством дрейфовых каналов, в которых располагаются эмиттеры (рис. 1). Технология формирования дрейфовых каналов предусматривает три основных варианта. Первый – это изготовление интегральной структуры в кармане с межкомпонентной изоляцией по планарно-эпитаксиальной или изопланарной технологии. По второму варианту диффузионная область канала формируется в кармане с полной диэлектрической изоляцией. Третий вариант предусматривает диэлектрическую изоляцию каждого канала в отдельности. Применение последнего варианта представляется наиболее целесообразным. В данном случае исключается взаимодействие движущихся носителей заряда между собой, поэтому при проектировании прибора не требуется учет этого сложного и нелинейного процесса. Разделение каналов позволит создавать структуры с максимальным количеством эмиттеров, размещенных на разных расстояниях l_k от коллектора ($k = \overline{1, M}$, где M – количество эмиттеров).

Для изготовления формирователя по третьему конструктивно-технологическому варианту наиболее оптимальна стандартная ЕРІС-технология [9, с. 213]. С помощью селективного травления в монокристаллическом кремнии создаются канавки требуемой глубины, на поверхности которых выращивается оксидная пленка. Затем методом пиролитического разложения моносилана осаждается поликристаллический кремний. После осаждения поликристаллического кремния пластина шлифуется и полируется с обратной стороны вплоть до изоляции. В оставшихся после травления кремниевых областях формируются пролетные каналы прибора.

Количество эмиттеров M и расстояния от них до коллекторной шины l_k выбираются в зависимости от требуемых параметров сигнала. При этом максимальная длина канала, очевидно, не должна превышать диффузионную длину неосновных носителей заряда в материале канала, т.е. в нашем случае $\max(l_k) < L_n$, где L_n – диффузионная длина электронов. Для высокоомных слоев кремния, которые требуются для создания функциональной структуры, предельная длина канала находится в интервале 1.1–1.5 мм. Ширина канала выбирается в зависимости от максимальных значений тока I и напряжения U согласно формуле: $w = \rho I / (hU)$, где ρ и h – удельное сопротивление и толщина канала.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Принцип работы предлагаемого прибора заключается в инжекции неосновных носителей заряда (НЗ) в объем полупроводника и их последующем диффузионно-дрейфовом транспорте под действием внешнего электрического поля, которое прикладывается к образцу в продольном направлении. Инжекция НЗ производится с помощью эмиттера, который смещается в прямом направлении. На коллекторном квазиомическом контакте происходит экстракция НЗ. Об изменениях концентрации НЗ можно судить по напряжению U на нагрузочном сопротивлении, включенном последовательно прибору в цепи схемы. Это напряжение может быть усилено и зарегистрировано осциллографом, развертка которого запускается генератором.

Пусть к кремниевому образцу p -типа приложено продольное электрическое поле напряженностью E . В объем полупроводника инжектируются электроны, которые под действием электрического поля двигаются в направлении x к коллекторному контакту и обуславливают ток плотностью

$$j_n = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} - qn\mu_n E, \quad (1)$$

где $n = n(x, t)$ – концентрация электронов, q – заряд электрона, μ_n и D_n – подвижность и коэффициент диффузии электронов. Коэффициент диффузии и подвижность связаны между собой соотношением Эйнштейна: $D_n = k_B T \mu_n / q$, где k_B – постоянная Больцмана, T – температура. Для нахождения функции $n = n(x, t)$ необходимо решить уравнение непрерывности

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} = G - R, \quad (2)$$

где G и R – скорости генерации и рекомбинации. Подставляя (1) в (2), а также учитывая, что в момент прекращения инжекции $G = 0$ и $R = n/\tau_n$, находим

$$\hat{A}n = -\frac{n}{\tau_n}, \quad \hat{A} = \frac{\partial}{\partial t} - D_n \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial}{\partial x}, \quad (3)$$

где \hat{A} – дифференциальный оператор, τ_n – время жизни электронов. Уравнение (3) – линейное уравнение в частных производных параболического типа. Его решение, соответствующее ограниченному источнику электронов, можно получить методом интегральных преобразований:

$$n(x, t) = \frac{n_0 \exp(-t/\tau_n)}{2\sqrt{\pi D_n t}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_n E t)^2}{4D_n t}\right), \quad n_0 = \lim_{t \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} n(x, t) dx, \quad (4)$$

где n_0 – полное количество инжектированных электронов, приходящееся на единицу площади p - n -перехода. Величина n_0 зависит от напряжения смещения на эмиттере и может быть рассчитана с использованием закона действующих масс и уравнения Шокли для идеального диода. Таким образом, получаем [10, 11]:

$$n_0 = \frac{n_i^2 \sqrt{D_n \tau_n}}{N_A} \left[\exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right], \quad n_i = 2.5 \times 10^{19} (m_c m_v)^{3/4} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{qE_g}{2k_B T}\right), \\ m_c = 1.045 + 4.5 \times 10^{-4} T, \quad m_v = 0.523 + 1.4 \times 10^{-3} T - 1.48 \times 10^{-6} T^2, \quad (5) \\ E_g = \begin{cases} 1.170 + 1.059 \times 10^{-6} T - 6.05 \times 10^{-7} T^2, & T \leq 170 \text{ К} \\ 1.1785 - 9.025 \times 10^{-5} T - 3.05 \times 10^{-7} T^2, & T > 170 \text{ К} \end{cases}$$

где n_i – концентрация собственных НЗ (см^{-3}), N_A – концентрация акцепторной примеси в подложке/канале (см^{-3}), $E_g = E_g(T)$ – ширина запрещенной зоны (эВ).

Если на кристалле имеется M эмиттеров, находящихся на расстояниях l_k от коллекторного контакта, то при одновременной инжекции из них на нагрузочном сопротивлении получают раздельные во времени импульсы напряжения. Амплитуда этих импульсов прямо пропорциональна концентрации электронов, дошедших до коллектора под действием внешнего электрического поля. Следовательно, результирующий импульс на

коллекторе будет определяться суммарной концентрацией электронов

$$\bar{n}(t) = \sum_{k=1}^M n(l_k, t). \quad (6)$$

Для моделирования процесса переноса электронов с помощью (4)–(6) необходимо задать подвижность и время жизни как функции концентрации легирующей примеси и температуры. Для подвижности электронов в кремнии (размерность $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) можно воспользоваться эмпирической формулой [12, с. 31]:

$$\mu_n(N, T) = \left[65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{N}{8.5 \times 10^{16}} \right)^{0.72}} \right] \left(\frac{T}{300} \right)^b, \quad (7)$$

$$b = \begin{cases} -2.6, & N \leq 10^{15}, \\ 0.356 \ln N - 14.9, & 10^{15} < N < 10^{20}, \\ 1.5, & N \geq 10^{20}, \end{cases} \quad (8)$$

где $N = N_A + N_D$ – суммарная концентрация легирующей примеси (см^{-3}). Из анализа данных, представленных в [13, 14], следует, что для расчета времени жизни электронов в легированном кремнии можно принять эмпирическую формулу

$$\tau_n(N, T) = \frac{3.95 \times 10^{-4}}{1 + \frac{N}{7.1 \times 10^{15}}} \left(\frac{300}{T} \right)^2. \quad (9)$$

Формулы (4)–(9) представляют собой математическую модель инжекционного диффузионно-дрейфового формирователя импульсов.

Были проведены численные эксперименты по (4)–(9) для образцов с различными уровнями легирования, параметры которых приведены в табл. 1. Пример результатов моделирования для прибора с тремя электродами представлен на рис. 2. В расчетах было принято: $U = 0.6$ В; $E = 100$ В/см; $l_k = 20, 150, 350$ мкм. Можно видеть, что в структуре возникают хорошо разделенные во времени пакеты сигналов. Чем ниже уровень легирования подложки, тем выше концентрация ННЗ, дошедших до коллекторного контакта. Это в основном связано с увеличением параметра n_0 , т.е. фактически с возрастанием уровня инжекции. На ширину импульсов влияет подвижность ННЗ, которая связана с коэффициентом диффузии.

Если эмиттеры расположены слишком близко друг к другу, то сигналы от них на коллекторе могут накладываться друг на друга. Моделирование показывает, что эффективно увеличить количество эмиттеров и уменьшить расстояние между ними можно, если увеличить напряженность поля E . Это обусловлено тем, что дрейфовая скорость ННЗ растет пропорционально E , в то время

как диффузионная составляющая скорости в слабом электрическом поле остается постоянной. Изменяя E , можно регулировать частоту следования импульсов, что дает возможность применить частотную модуляцию. Напряжение U влияет на уровень инжекции. При $n(x, t)/N_A \gg 1$ имеет место высокий уровень инжекции и математическая модель (4)–(9), в частности граничное условие Шокли (5), уже не может применяться.

Рост температуры приводит к увеличению концентрации собственных носителей заряда и уровня результирующего сигнала. Для устранения этого нежелательного влияния в приборе можно предусмотреть простой компаратор выходного сигнала на одном транзисторе и/или температурную стабилизацию напряжения инжекции по аналогии с ЭСЛ-схемами. Кроме того, компарирование выходного сигнала по определенному уровню приведет к преобразованию этого сигнала из аналогового вида к цифровому. В этом случае сигнал уже будет представлять собой двоичную последовательность прямоугольных импульсов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментального исследования был реализован измерительный стенд, схема которого показана на рис. 3. Полупроводниковый образец 1 закреплялся на подвижном столике 2. Перемещение столика контролировалось посредством микрометрической шкалы с точностью до 10 мкм. К образцу 1 прикладывается внешнее электрическое поле E от источника питания. Последовательно к полупроводниковому образцу включено сопротивление нагрузки R . Инжекция ННЗ в объем полупроводника происходит с зондов 3 в момент подачи короткодействующего импульса напряжения от генератора Г5–54. Положение зондов фиксировалось с помощью зондового манипулятора под визуальным контролем при помощи микроскопа МБС-9 с микрометрическим окуляром. В качестве зондов использовали вольфрамовые иглы, заточенные электрохимическим методом. Зонды располагались на расстояниях 100, 500 и 900 мкм от коллекторного контакта. Выходной сигнал снимался с резистора R при по-

Таблица 1. Электрофизические параметры образцов при $T = 300$ К

Образец	$N_A, \text{см}^{-3}$	$\mu_n, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\tau_n, \text{мс}$
КДБ-7.5	6.443×10^{14}	1293	0.362
КДБ-10	4.807×10^{14}	1300	0.370
КДБ-40	1.184×10^{14}	1319	0.389

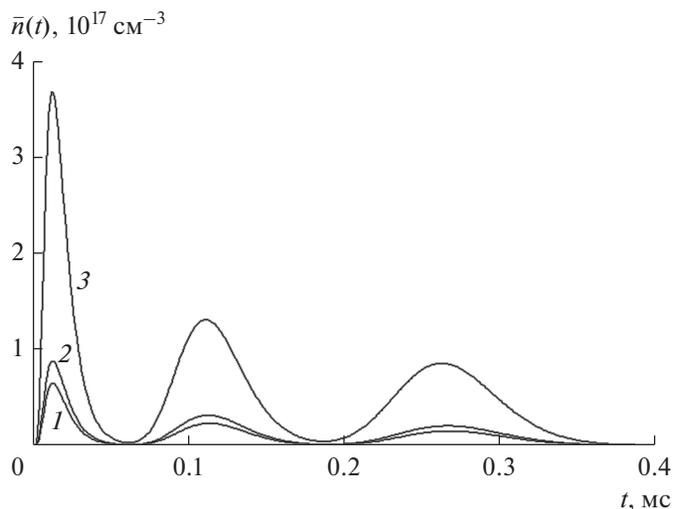


Рис. 2. Результат моделирования: 1 – КДБ-7.5; 2 – КДБ-10; 3 – КДБ-40.

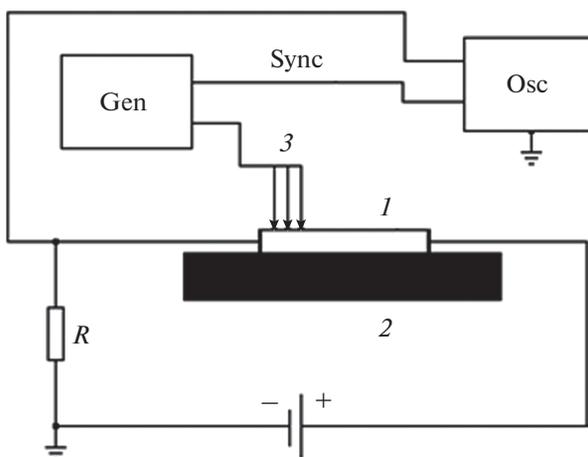


Рис. 3. Схема измерительного стенда.

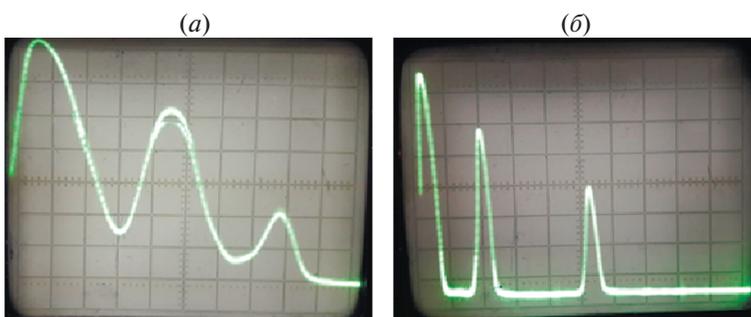


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы: (а) Si; (б) Ge.

мощи осциллографа С1-99 с внешней синхронизацией от генератора.

Измерения проводились на высокоомных образцах кремния и германия дырочного типа проводимости. Эксперименты на германии проводились с целью установить роль подвижности ННЗ

(у германия она выше, чем у кремния почти в три раза [10]). Осциллограммы сигналов приведены на рис. 4. Эксперименты показали, что разделение отдельных импульсов более четко осуществляется при использовании материала с высокой подвижностью – в нашем случае германия. Не-

смотря на это, кремний можно считать перспективным материалом, так как применение стандартных и хорошо отработанных микротехнологий будут способствовать улучшению характеристик сигнала за счет применения встроенных n^+ -эмиттеров и коллекторных контактов, разделенных проводящих каналов, уменьшения токов утечки и т.п. Отметим, что высокая подвижность носителей заряда имеется у GaAs, который также можно рассматривать как перспективный материал для изготовления прибора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная конструкция однокристального формирователя электрических импульсов, принцип работы которого основан на процессах инжекции, диффузии и дрейфа ННЗ под действием электрического поля. Проведены теоретические и экспериментальные исследования прибора. Из полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1) с увеличением удельного сопротивления материала подложки увеличивается количество ННЗ, входящих до коллектора (увеличивается уровень инжекции и подвижность ННЗ, снижается скорость рекомбинации ННЗ);

2) теоретически и экспериментально выявлена возможность управления частотным спектром выходного сигнала посредством изменения напряженности поля дрейфа ННЗ — чем выше напряженность поля, тем выше частота гармоник выходного сигнала;

3) с увеличением напряженности электрического поля E улучшается разделение во времени пакетов сигналов, создаваемых инжектированными ННЗ с различных расстояний от коллектора;

4) посредством изменения расстояния между эмиттером и коллектором можно управлять пространственно-временным распределением концентрации ННЗ.

Предложенный прибор может быть рекомендован для изготовления на предприятиях микро-

электроники и использования в современной радиоэлектронной аппаратуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Poplavko Y.M.* Electronic materials: principles and applied science Elsevier, 2019.
2. *Wu W.* Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications // Science and Technology of Advanced Materials. 2019. V. 20. № 1. P. 187–224.
3. *Yi J., Li S.* Functional materials and electronics // Apple Academic Press, 2018.
4. *Ghodssi R., Lin P.* MEMS materials and processes handbook. Springer, 2011.
5. *Bogdanov Y.I., Fastovets D.V., Bantysh B.I., Chernyavskii A.Y., Semenikhin I.A., Bogdanova N.A., Katamadze K.G., Kuznetsov Y.A., Kokin A.A., Lukichev V.F.* Methods for analysing the quality of the element base of quantum information technologies // Quantum Electronics. 2018. V. 48. № 11. P. 1016–1022.
6. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
7. *Wade G.* Signal coding and processing. University of Plymouth, 1994.
8. *Bowers D.M.* Access control and personal identification systems. Butterworth, 1988.
9. *Коледов Л.А.* Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. СПб.: Издательство “Лань”, 2007.
10. *Росадо Л.* Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высш. шк., 1991.
11. *Gaensslen F.H., Jaeger R.C., Walker J.J.* Low-temperature threshold behavior of depletion mode devices — Characterization and simulation // Proc. Int. Electron Device Meeting, IEEE, 1976. P. 520–524.
12. *Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.* Полупроводниковые приборы. Энергоатомиздат, 1990.
13. *Selberherr S.* Analysis and simulation of semiconductor devices. Springer-Verlag/Wien, 1984.
14. *Бубенников А.Н.* Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высш. шк., 1989.