

Приборы со статической индукцией

Юрий Максименко, Виктория Грабежова
ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий “Вега”»

Рассмотрена история появления и развития нового класса приборов на Si – приборов со статической индукцией, которые способны работать как в полевом, так и в биполярном режиме. Предложены новые конструктивно-технологические пути построения СИТ и БСИТ с уникальными ключевыми параметрами, создание которых особенно необходимо для таких отраслей, как самолётостроение и электротранспорт. Технологические пути построения предлагаемых приборов базируются на хорошо освоенных в серийном производстве приёмах, что позволяет создавать их с низкой себестоимостью. Проведён сравнительный анализ по основным ключевым параметрам предлагаемых приборов с лучшими высоковольтными приборами на SiC и GaN. Показано, что предлагаемые приборы по основным ключевым параметрам существенно их превосходят. Замена в СИТ обычного p⁺-истока на изотипный гетеропереход, возможно, позволит перейти на новый физический принцип движения тока в полупроводнике – с зонного на фононный.

Введение

Сегодня с быстрым развитием электрифицированных отраслей, таких как электротранспорт, самолётостроение, средства электропитания и т.д., очень актуальным становится создание эффективных (идеальных) ключей. Ключевые высоковольтные приборы IGBT из-за наличия на пути протекания тока трёх p-n-переходов и низкого быстродействия не отвечают современным требованиям по статическим и динамическим потерям. Зарубежные полупроводниковые компании при построении высоковольтных ключей активно переходят на широкозонные материалы (SiC и GaN). В России из-за отсутствия технологий по созданию широкозонных материалов SiC и GaN работы по созданию таких приборов находятся на начальных этапах.

Авторами данной статьи разработаны новые конструктивно-технологические приёмы построения высоковольтных приборов со статической индукцией (СИТ) на Si, которые позволят создать приборы, превосходящими по параметрам лучшие зарубежные приборы на SiC и GaN.

История появления приборов с электростатическим управлением началась с опубликованной в 1952 году работы W. Shockly, в которой дано теоретическое описание «униполярного полевого транзистора» [1]. Принцип его

действия основан на модуляции тока основных носителей заряда за счёт изменения толщины проводящего канала, обусловленного изменением обеднённой области p-n-перехода.

В процессе разработки и исследований полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом (ПТУП) было обнаружено, что в ряде случаев выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов в теории имели не «пентодный», а «триодный» вид [2–4]. Однако объяснить это явление и воспроизвести структуры, обладающие ненасыщающимися выходными ВАХ, авторам этих работ не удалось.

Изучение ПТУП с «триодными» ВАХ было впервые проведено профессором Нишизаовой [5]. В его работе ненасыщенные характеристики базировались на использовании эффекта отрицательной обратной связи в ПТУП, обусловленной наличием сопротивления канала. При этом считалось, что величина последовательного сопротивления канала в случае пентодных характеристик после достижения напряжения смыкания определяется протяжённостью обеднённой области канала, которая, в свою очередь, зависит как от напряжения затвористок ($U_{зи}$), так и от величины омического падения напряжения, обусловленного протеканием тока по каналу. С увеличением тока стока, вызванно-

го приращением напряжения на стоке ($U_{си}$), падение напряжения в канале возрастает, вызывая увеличение напряжения на управляющем p-n-переходе и расширение его области пространственного заряда (ОПЗ). В итоге протяжённость обеднённой области канала увеличивается, растёт его сопротивление, что приводит к уменьшению приращения протекающего через канал тока. Отметим, что аналогичный механизм насыщения ВАХ ПТУП описан и С.М. Зи [6].

Согласно работам [5, 6] крутизна транзистора в насыщенном режиме определяется соотношением:

$$S = \frac{S^*}{1 + R_u \cdot S^*}, \quad (2)$$

где S^* – крутизна транзистора, не охваченного отрицательной обратной связью.

Вводя определения выходного сопротивления прибора:

$$r_{\text{вых}} = \frac{dU_{\text{си}}}{dI_c} = \text{const} = \frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}} \cdot \frac{dU_{\text{зи}}}{dI_c} \quad (3)$$

и коэффициента усиления по напряжению

$$\mu = \frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}} \cdot I_c = \text{const}, \quad (3)$$

авторы [5] получили:

$$r_{\text{вых}} = \mu \frac{1}{S} + R_c, \quad (4)$$

где R_c – сопротивление в цепи стока, включённое последовательно с сопротивлением канала;

I_c – ток стока;

$U_{\text{си}}$ – напряжение между стоком и истоком;

$U_{\text{зи}}$ – напряжение между затвором и истоком;

S – крутизна.

С возрастанием напряжения на стоке величина R_u , согласно [5], увеличивается, величина $R_u \cdot S^*$ становится намного больше единицы и, как следует из (1) и (4), выходное сопротивление прибора стремится к величине

$$r_{\text{вых}} = \mu \cdot R_u + R_c. \quad (5)$$

Из этого соотношения следует, что при определении μ как константы, зависящей от электрофизических параметров прибора, выходное сопротивление определяется сопротивлением канала. В [5] было предположено, что

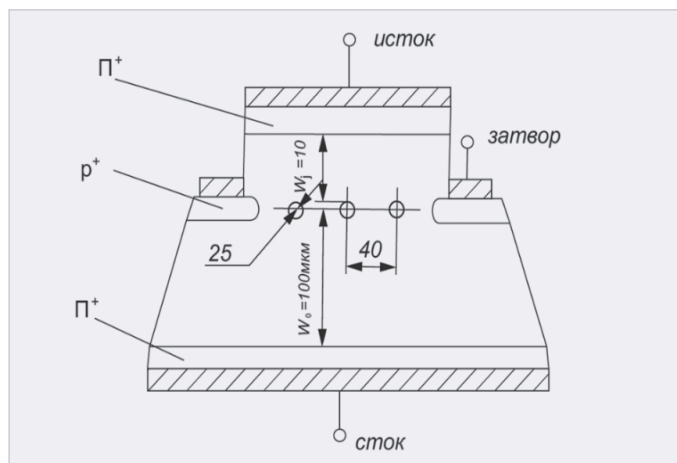


Рис. 1. Структура кристалла транзистора со статической индукцией [5]



Рис. 2. Выходные ВАХ транзистора со статической индукцией [5]

при значительном снижении $R_{и}$ по сравнению с существующими аналогами может не только повышаться крутизна транзистора S , но и существенно уменьшаться его выходное сопротивление, что, в свою очередь, должно привести к изменению вида выходных вольт-амперных характеристик.

На основе этих качественных положений авторами [5] была предложена конструкция транзистора с управляющим p-n-переходом, отличающаяся от ранее известных конструкций очень малым расстоянием между затвором и истоком, малыми размерами областей затвора, близких по форме к цилиндрическим, и очень низкой концентрацией примеси в канале. Схематически конструкция прибора представлена на рис. 1, а его выходные характеристики – на рис. 2. Как следует из рис. 2, транзистор с этой конструкцией имеет ненасыщающиеся исходные характеристики «триодного» типа. Появление таких характеристик связывается с выполнением соотношения $R_{и} \cdot S^* < 1$ во всей рабочей области значений токов и напряжений стока [7].

По принятой к настоящему времени в литературе терминологии данный прибор является транзистором со статической индукцией со скрытым (захороненным) затвором. Принцип его действия сводится к следующему. При отсутствии напряжения на затворе ($U_{зи} = 0$) каналы «открыты», и ВАХ транзистора близка к ВАХ полупроводникового $n^+-n^-n^+$ -резистора. С увеличением обратного напряжения на управляющем p⁺-n⁻-переходе его ОПЗ расширяется и перекрывает канал, вызывая отсечку тока стока.

Ввиду малой глубины отрицательной обратной связи, обусловленной

малым значением $R_{и}$, прибор является «плохим генератором тока» и может быть заблокирован относительно невысоким потенциалом затвора при заданном $U_{си}$. Напряжённость электрического поля вблизи истока p⁺-затворов на стадии блокирования оказывается направленной таким образом, что выходящие из истока электроны тормозятся и не могут преодолеть возникший потенциальный барьер. Напряжённость поля в любой точке вдоль канала является векторной суммой напряжённостей тормозящего поля затвора \vec{E}_1 и ускоряющего поля стока \vec{E}_2 (исток обычно соединяется с землей). При возрастании напряжения на стоке напряжённость увеличивается:

$$\Delta E_2 \approx \frac{\Delta U_{си}}{W_0}, \quad (6)$$

где $\Delta U_{си}$ – приращение напряжения сток-исток;

W_0 – расстояние между электронной-нейтральной областью стока и «внутренним» затвором.

В нулевом приближении приращение напряжённости поля затвора можно определить из соотношения [5]:

$$\Delta E_2 \approx \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta W_3}, \quad (7)$$

где W_3 – расстояние между электронной-нейтральной областью истока и «внутренним» затвором.

При неизменном $U_{зи}$ и возрастании $U_{си}$ \vec{E}_1 неизменен, а \vec{E}_2 увеличивается, и при выполнении условия

$$\vec{E}_1 > \vec{E}_2 \quad (8)$$

ток в канале возобновляется, т.е. прибор открывается напряжением на стоке. Из соотношений (6)–(8) можно оценить коэффициент усиления по напряжению таких структур:

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \approx \frac{W_0}{W_3}. \quad (9)$$

На основании рассмотренных механизмов включения и запирания в работе [5] предложено назвать приборы этого типа «приборами со статической индукцией» (англ. – Static Induction Transistor – SIT), поскольку их работа основана на эффекте статической индукции через объёмно-заряженный диэлектрик.

Дальнейшие исследования выходных ВАХ, проведённые в работе [8], показали, что в области малых значений ток стока растёт экспоненциально при увеличении $U_{си}$. В области больших значений токов выходные ВАХ приближаются к линейным, что связывают с увеличением сопротивления канала и приближением произведения $R_{и} \cdot S^*$ к единице. Наконец, в области весьма больших значений токов стока, которые зачастую не достигаются в реальных приборах в допустимых рабочих режимах, эффект сужения канала вследствие омического падения напряжения на его сопротивлении становится доминирующим, и ВАХ транзистора переходят в «квазипентодные», подобно ВАХ полевых транзисторов с длинным каналом.

Распределение потенциала по оси канала транзистора со статической индукцией показано на рис. 3.

С ростом напряжения стока потенциальный барьер, обусловленный действием обратнорасположенного p-n-перехода затвора, понижается и сдвигается в сторону истока [9]. Эффект уменьшения высоты барьера, препятствующего протеканию основных носителей заряда в канале, эквивалентен повышению прямого смещения на обычном p-n-переходе с той лишь разницей, что в СИТ проводимость обусловлена только одним

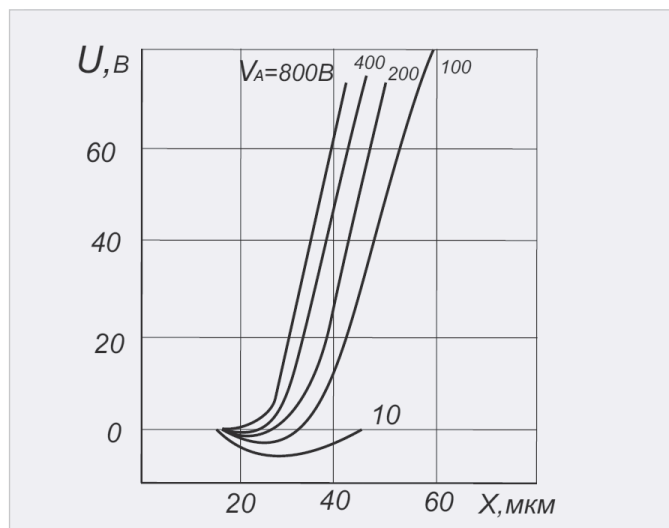


Рис. 3. Распределение потенциала по оси канала транзистора и тиристора со статической индукцией [9]

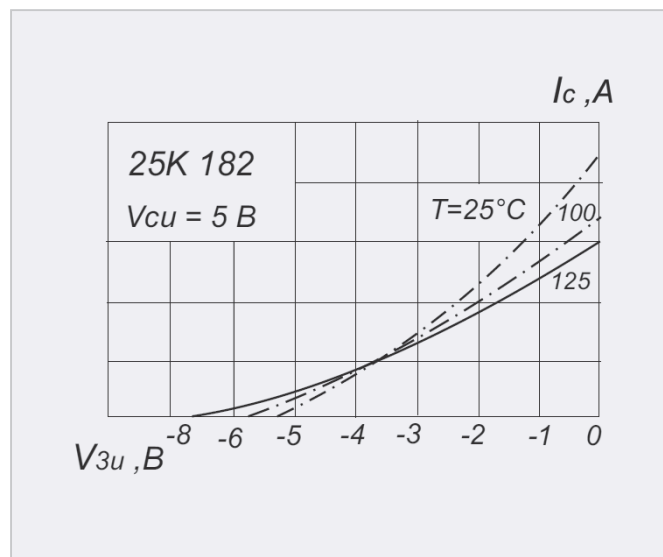


Рис. 4. Температурная зависимость тока стока СИТ [10]

типом носителей заряда. Это позволяет объяснить экспоненциальный участок на выходной и передаточной ВАХ в области малых токов, где значение высоты потенциального барьера велико. При уменьшении высоты барьера с ростом $U_{си}$ ток стока определяется главным образом сопротивлением канала. Поскольку $R_{и} \cdot I_c \leq U_{зи}$, и эффект модуляции ширины канала за счёт омического падения напряжения на его сопротивлении практически отсутствует, ВАХ приближается к линейной.

О температурной зависимости тока стока СИТ можно судить по передаточной характеристике прибора, приведённой на рис. 4 [10].

Температурный коэффициент тока стока в области малых токов является положительным, что хорошо коррелирует с представлениями о переносе заряда в данном режиме работы транзистора «горячими носителями заряда», преодолевающего потенциальный барьер в канале. В области больших значений тока стока температурный коэффициент меняет знак, что указывает на определяющее влияние на ток стока температурной зависимости проводимости канала [8]. Последнее обстоятельство обеспечивает, в частности, эффективную работу транзисторов при параллельном включении, что позволяет создавать мощные приборы со сложной ячеистой структурой.

Монополярный механизм переноса тока, отсутствие накопления заряда при работе во всём диапазоне токов [11] и высокая крутизна обеспечивают весьма высокие скорости переключения и рабочие частоты СИТ. Для ана-

лиза частотных свойств в литературе часто пользуются эквивалентной схемой замещения [12], которая приведена на рис. 5. Участок, окружённый прерывистой линией, представляет собой «внутренний» транзистор без учёта паразитных параметров корпуса.

Согласно эквивалентной схеме замещения (рис. 5) максимальная частота генерации определяется выражением [12]:

$$F_{\max} = \frac{g_m}{2\pi + (C_{зи} + C_{зс})}, \quad (10)$$

где $C_{зи}$ – ёмкость затвор-исток;

$C_{зс}$ – ёмкость затвор-сток;

g_m – крутизна характеристики внутреннего транзистора.

Согласно формуле (10) для повышения высокочастотных свойств необходимо увеличить крутизну характеристики и уменьшить ёмкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$. Авторы работы [12], рассматривая конструкцию транзистора с планарным затвором, считают, что «внутреннее» сопротивление затвора намного меньше внешнего, и не принимают его в рассмотрение. В конструкциях же со скрытым затвором оно имеет достаточно большую величину. С повышением частоты падение напряжения на нем растёт, напряжение, приложенное к управляющему р-п-переходу, уменьшается, и коэффициент усиления с ростом частоты падает.

Ухудшение частотных свойств с ростом $R_з$ приводит, соответственно, к ухудшению временных характеристик переключения транзистора. Процесс выключения транзистора протекает следующим образом. При подаче на затвор импульса запирающего напряжения ОПЗ управляюще-

го р-п-перехода начинает расширяться с постоянной времени, определяемой произведением ёмкости затвора на его сопротивление. После смыкания ОПЗ в канале поток носителей заряда от истока к стоку прерывается и время задержки тока стока определяется в основном пролётным временем носителей заряда от потенциального барьера до стокового n^+ -перехода.

Процесс включения транзистора состоит из тех же основных стадий, что и процесс выключения: перезарядки ёмкости управляющего р-п-перехода и пролёта носителей заряда от затвора к стоку.

В литературе до сих пор отсутствуют данные, которые позволяли бы проводить количественную оценку влияния электрофизических и конструктивных параметров приборов со статической индукцией на времена включения и выключения. Представленная в [12] эквивалентная схема замещения даёт только качественное представление этих связей.

Конструкция СИТ с планарным затвором, приведённая на рис. 6 [13–16], позволяет существенно уменьшить сопротивление затвора путём его металлизации и тем самым улучшить частотные свойства прибора, повысить однородность распределения тока в структуре при переключении, улучшить нагрузочную способность и надёжность.

Недостаток конструкций, представленных в [13–16], – невозможность создавать приборы на высокие рабочие напряжения с большими значениями коэффициента усиления по напряжению.

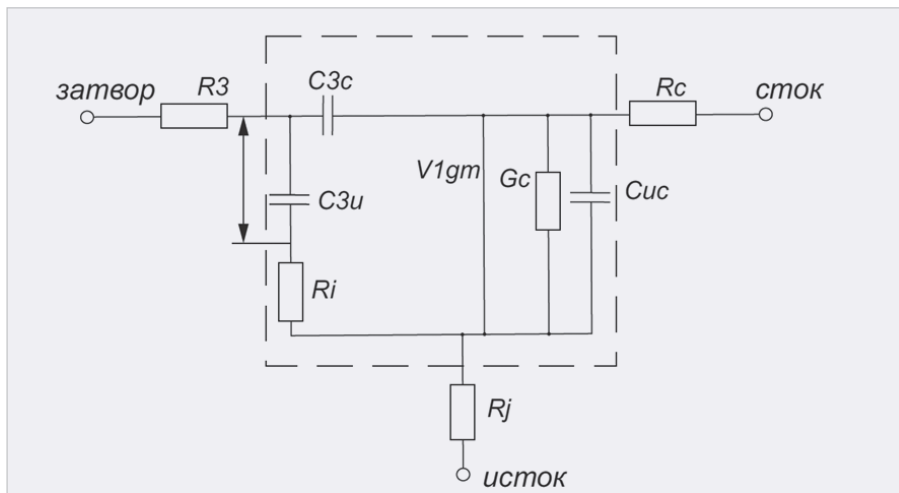


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения транзистора со статической индукцией [12]

Первые серийные транзисторы, предназначенные для работы на высоких частотах, в основном выполнены с использованием планарной конструкции, приведённой на рис. 6. На её базе разработаны транзисторы MF-174, MF-175 с выходной мощностью 100 Вт на частотах 100 МГц и 1 ГГц [17–20].

Надо отметить, что известные серийные транзисторы с планарным затвором, обладающие высоким быстродействием, имеют невысокие рабочие напряжения (около 100 В) и большое сопротивление канала (5–10 Ом) [20], поэтому их использование в качестве мощных быстродействующих ключей неэффективно. Однако высокое быстродействие СИТ с планарным затвором, судя по [20], заставляет конструкторов и технологов вести поиск таких оптимальных форм областей затвора планарного типа и технологических приёмов их формирования, которые позволили бы исключить присутствующие данному варианту недостатки.

Интерес к данному конструктивному варианту усиливается ещё и тем обстоятельством, что СИТ в силу малого сопротивления в цепи затвора способен работать при прямом смещении управляющего р-n-перехода [21, 22]. При этом его выходное сопротивление уменьшается более чем на два порядка.

Первые разработки СИТ в России проводились в ОКБ при НЭВЗ одним из авторов данной работы. Были созданы транзисторы с рабочей частотой 1 ГГц и выходной мощностью 10 Вт. Поскольку одновременно на предприятии был разработан СВЧ биполярный транзистор (БТ) с рабочей частотой 2 ГГц, было принято решение проводить работы по созданию мощных

высоковольтных СИТ для усилителей мощности и ключевых схем.

Для создания СИТ с рабочим напряжением выше 100 В с планарным затвором была разработана новая технология формирования структуры кристалла [23], которая позволила создавать приборы с рабочим напряжением до 1500 В. Первым прибором, разработанным по данной технологии, был транзистор КП801 с рабочим напряжением 200 В и током 8 А [24] по заданию Бердского радиозавода для выходных каскадов усилителей мощности электропроигрывателей «Артур» и «Вега» [25]. Далее был разработан транзистор КП802 с рабочим напряжением 500 В и током 2,5 А для вторичных источников электропитания. В 1988 году был разработан транзистор КП926 с рабочим напряжением 450 В, током 16,5 А и сопротивлением в открытом состоянии 22 мОм [26], который был первым в мире высоковольтным транзистором, способным работать как в полевом, так и в биполярном режиме.

На рис. 7 представлен вид сверху кристалла транзистора КП926 и фрагмент его поперечного разреза.

Для более плотного заполнения площади кристалла истоком топология выполнена по принципу Oberlei (см. рис. 8).

Работает КП926 следующим образом. Для запираания транзистора на затвор подаётся отрицательное напряжение, и ОПЗ перекрывает канал. Для открывания и перевода транзистора в биполярный режим в затвор вкачивается ток. Дырки из р⁺-области затвора впрыскиваются в канал. Так как область n⁺-истока и р⁺-область затвора расположены очень близко друг к другу (около 1 мкм), прямо под областью исто-

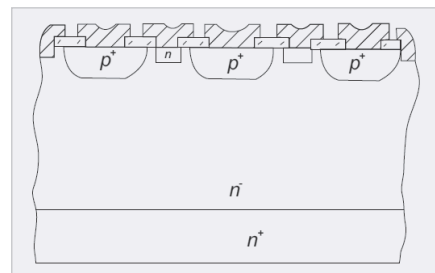


Рис. 6. Структура транзистора со статической индукцией с планарным затвором 8, 13

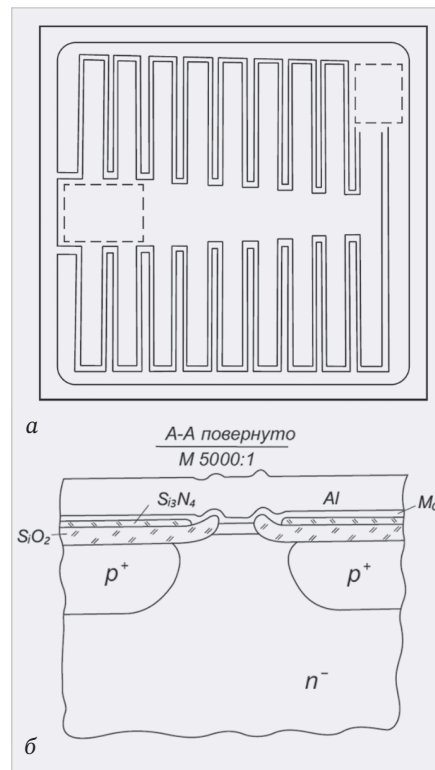


Рис. 7. Кристалл транзистора КП926: а) вид сверху; б) фрагмент поперечного разреза

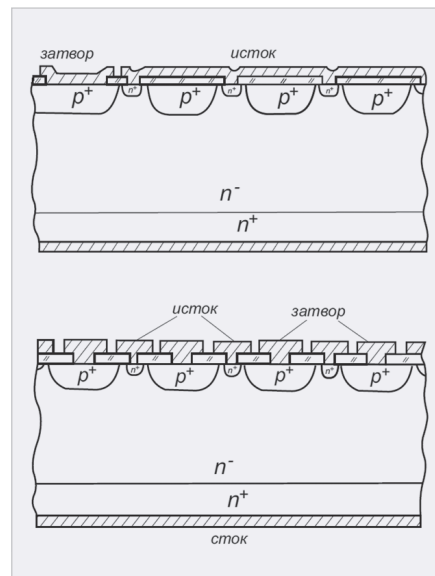


Рис. 8. Поперечный разрез кристалла КП926 с вариантом металлизации по принципу Oberlei

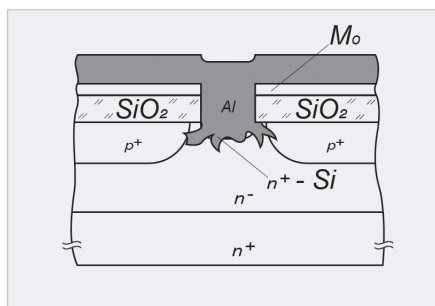


Рис. 9. Разрез кристалла с отсутствием Mo над областью истока из-за наличия дефекта в фотошаблоне после вжигания Al

ка формируется положительный заряд, который вытягивает электроны. Создаётся электроннодырочная плазма, которая модулирует n^- -область стока, и сопротивление этой области уменьшается более чем на три порядка – с 0,5 Ом в полевом режиме до 0,0001 Ом. Сопротивление транзистора по ТУ в биполярном режиме 22 мОм определяется металлизацией кристалла и корпусированием. Выключение транзистора происходит очень быстро – на затвор подаётся отрицательный импульс, и дырки из канала вытягиваются в затвор. Часть их рекомбинируют в канале с электронами.

На базе транзисторов КП926 разработчики вторичных источников питания (ВИП) создавали преобразователи, работающие на частоте 100 кГц. Многие из них предполагали (И.А. Криштафович, Институт электродинамики, г. Киев; Н.М. Тугов, МЭИ), что КП926 способен работать на частоте 1 МГц, но нет комплектующих (диодов, дросселей).

Для некоторых разработчиков ВИП транзистор КП926 вызывал неудобства из-за того, что он нормально открыт. В 1992 году был разработан аналог КП926 – транзистор КТ9154 с нормально закрытым каналом. Транзисторы с нормально закрытым каналом стали называть БСИТ. Далее была разработана серия СИТ и БСИТ с рабочими напряжениями от 150 до 1200 В (КП938, КП942 и т.д.).

Летом 1988 года НЭВЗ посетил изобретатель СИТ японский профессор Нишизава для знакомства с нашими разработками и производством СИТ. В разговоре с автором данной статьи Ю.Н. Максименко он отметил, что мы существенно опередили его, и ему нет смысла далее заниматься приборами со статической индукцией. Действительно, после 1988 года работы Нишизавы по этим приборам не появлялись.

Что же случилось с этими уникальными приборами далее? Почему их сегодня нет в России?

В 1992 году все новосибирские электронные предприятия (НЭВЗ, НЗПП и НЭВИ) объединили в НПО «Адрон», который возглавил С.И. Новотный. Руководство «Адрона» решило все усилия направить на выпуск схем памяти и закрыть направление силовой электроники. Руководство НЭВЗ (В.С. Медведко) передало серийно освоенные СИТ на Александровский полупроводниковый завод. Когда автор статьи приехал на завод по вопросам освоения, оказалось, что на заводе работает бывший наш технолог, которого в своё время уволили с НЭВЗ, а затем из ОКБ при НЭВЗ за плагиат и который вместе с руководством завода решил сам разрабатывать СИТ и БСИТ.

Таким образом, в 1992 году разработанные Ю.Н. Максименко и освоенные в серийном производстве приборы со статической индукцией перестали существовать.

Приборы, разработанные горе-технологом в Александрове, затем в Махачкале и ещё где-то, горели, как свечи [27]. Для увеличения процента выхода годных по кристаллу приборов он решил увеличить расстояние между затвором и истоком путём увеличения травления кремния и тем самым увеличил сопротивление затвора, что снизило на порядок быстродействие приборов, а также обусловило появление вторичного пробоя с повышением частоты преобразования в ВИП. Это привело к тому, что про СИТ забыли.

Справедливо будет заметить, что все разработанные СИТ и БСИТ имели существенный недостаток – высокую себестоимость из-за низкого процента выхода годных по кристаллу. Объяснить это можно следующим: все СИТ и БСИТ разрабатывались с использованием моей технологии формирования структуры кристалла [23], в которой, как потом выяснилось, были грубые ошибки.

С 1992 года автор статьи занимался разработкой принципиально новых приборов со статической индукцией – составных транзисторов СИТ-СИТ, СИТ с быстродействующим диодом, ключа с N-образной характеристикой, полностью защищённого ключа и т.д. По всем приборам были получены опытные образцы, которые проходили апробацию у разработчиков радиоэлектронной аппаратуры. В 1996 году

из-за развала ВПК направление микроэлектроники на НЭВЗ закрылось.

Только в 2020 году Ю.Н. Максименко вернулся к работам над приборами со статической индукцией. Проанализировав технологию формирования кристалла [23], автор статьи пришёл к выводу, что основная причина низкого процента выхода годных по кристаллу приборов – это дефектность фотошаблона для формирования окна к затвору по Mo. Из-за большой площади кристалла над областями истока попадал дефект фотолитографии, и молибден, который является барьерным слоем для Al, стравливался. Если над истоком нет Mo, то при вжигании Al происходят микрозакоротки истока с затвором (см. рис. 9). По ТУ норма на ток утечки между затвором и истоком при напряжении 25 В для транзистора КП926 установлена не более 1 мА. Если кристалл имел дефект, как показано на рис. 9, но утечка была меньше 1 мА, то он считался годным, хотя являлся потенциально ненадёжным.

Для устранения этого недостатка и ряда других была предложена новая технологическая схема формирования структуры кристалла, суть которой будет описана в отдельной работе.

На все новые приборы и технологические схемы поданы заявки на изобретения, а также написаны научные статьи [28–33]. На часть приборов уже получены положительные решения на изобретения [34–39].

В работе [31] представлена доработанная конструкция кристалла транзисторов КП926 и КТ9154, у которых эффективная ёмкость затвора уменьшена на порядок. Согласно уравнению (10) максимальная рабочая частота должна увеличиться на порядок, т.е. эти транзисторы будут способны работать на частотах до 10 МГц.

В работе [33] представлена новая конструкция кристалла транзисторов КП926 и КТ9154, у которых эффективная ёмкость затвора уменьшена ещё в три раза по сравнению с конструкцией, описанной в работе [31].

Конструкции, описанные в работах [31, 33], позволяют создавать высоковольтные ключевые приборы на Si с основными параметрами, значительно превосходящими ключевые приборы на SiC и GaN до максимальных рабочих напряжений 4–5 кВ [33].

Встает вопрос: а можно ли создавать СИТ на SiC и GaN и тем самым ещё улучшить параметры СИТ? Ответ – нет.

Таблица. Зависимость ОПЗ от приложенного к р-п-переходу обратного напряжения

Параметры, характеристики	Si	GaAs	SiC	GaN
Подвижность электронов, μ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1450	9200...11 000	900	1000
Ширина ОПЗ W_{p-n} , мкм (при $U = 200 \text{ В}$)	> 100	от 40	1,33...2,0	1,21...1,5
Относительная ёмкость р-п-перехода, С	0,1	1,0	> 30	> 30
Предельная частота переключения, МГц (при 600 В приборов)	> 10	-	0,15	2...5

В таблице приведена зависимость ОПЗ основных материалов, используемых в современной микроэлектронике, от приложенного к р-п-переходу обратного напряжения [40].

Из таблицы видно, что у материалов SiC и GaN зависимость ОПЗ от приложенного к р-п-переходу напряжения очень слабая. Создать СИТ с их использованием невозможно, но и при создании полевых MOSFET из-за этого возникают трудности – для управления транзистором необходимо высокое управляющее напряжение и тонкий подзатворный диэлектрик. Сегодня найдены решения по обходу этой проблемы, но за счёт усложнения технологии. Входная ёмкость

из-за тонкого диэлектрика высокая, и это ограничивает частотные свойства приборов.

Разработка приборов на Si по предложенным конструкциям позволяет создавать ключи с уникальными параметрами, которые значительно улучшат массогабариты и надёжность лётной электроники и электроники для электромобилей. Технология формирования кристаллов построена на хорошо освоенных в серийном производстве приёмах – Trench и Locos, поэтому себестоимость этих приборов должна быть низкой по сравнению с себестоимостью приборов на SiC и GaN.

Создание КП926 и КТ9154 с изотипным гетеропереходом [33] позволит

снизить сопротивление кристалла до 0,0005 мОм, что позволит уменьшить кристалл на 3-4 порядка. Но уменьшение кристалла приведёт к проблеме токоотвода. Возможно, нужно будет создавать конструкции с перевёрнутым монтажом кристалла.

Создание транзисторов на SiC и GaN с изотипными гетеристокками, которые модулировали бы низкоомную область стока, невозможно из-за конструктивных и электрофизических особенностей этих приборов.

Заключение

В данной работе рассмотрена история появления и развития нового класса приборов – приборов со статической индукцией. Их выходные характеристики триодного типа позволяют создавать мощные усилители НЧ с высоким качеством звучания, а способность работать как в полевом, так и в биполярном режимах – создавать идеальные ключи. Конструктивные особенности СИТ позволяют на их основе создавать принципиально новые приборы со статической индукцией: прибор с N-образной характеристикой (дефензор), СИТ с быстродействующей



Акционерное общество
ЭРКОН
Научно-производственное объединение



ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ

- Современная производственная база.
- Высокое качество.
- Индивидуальный подход к потребителю.

НОВИНКИ

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (50 Вт)
Аттенуаторы ПР1-25 (50 Вт, 100 Вт, 150 Вт, 250 Вт, 300 Вт, 500 Вт, 1000 Вт)
ТПИ - тепловые чип-перемычки
СВЧ-резисторы Р1-160 (до 40 ГГц)
Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)

603104, Г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д. 6.
тел.: 8 (831) 202 - 24 - 34 (многоканальный)
8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)
E-mail: info@erkon-nn.ru
www.erkon-nn.ru

Реклама

щим диодом, полностью самозащищённые приборы и т.д.

Создание приборов с высокими ключевыми характеристиками позволит превзойти по такому параметру, как кВт/л, лучшие зарубежные аналоги в преобразовательной технике, что очень важно для лётной отрасли. Не менее важно это и для электромобильной отрасли. Повышение эффективности ключа повысит пробег электромобилей на одной зарядке.

Сегодня ведущие фирмы России, разрабатывающие силовые приборы, такие как «Ангстрем», «Микрон» и др., знают о работах Ю.Н. Максименко, но по ряду объективно-субъективных причин стараются их не замечать и упорно продолжают работать над улучшением конструкций IGBT и MOSFET.

Работа написана с целью привлечь внимание людей, которые могут решить вопрос о начале разработок предлагаемых автором статьи приборов.

Литература

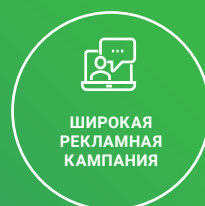
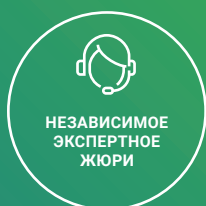
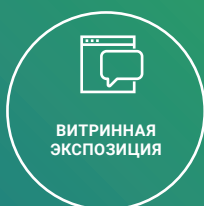
- Unipolar Field – Effect Transistor // Proc. IEEE. 1952. Vol. 40. № 11. P. 1375–1376.
- Zuleeg R. Asilicon space-charge-limited triode and analog transistor // Solid-State Electronics. 1967. Vol. 10. № 5. P. 449–460.
- Teszner S., Gicquel R. Gridistor – A new fieldeffect device // Proc. IEEE. 1964. Vol. 52. № 2. P. 1502–1513.
- Shumka A. A Germanium Solid-State Triode // I. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. № 1. P. 438–439.
- Nishizawa I., Terasaki T., Shibata I. Field-Effect Transistor Versus Analog Transistor (Static Induction Transistor) // IEEE Trans, on Electron Dev. 1975. Vol. 22. № 4. P. 185–197.
- Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. под ред. А.Ф. Трутко. М.: Энергия, 1975.
- Транзистор, управляемый полем: патент 52-6076 Япония: МКИ НОИ 29/80 / Nishizawa I. № 46-28405; заявл. 28.04.71; опубл. 18.11.77.
- Nishizawa I., Yamamoto K. High-Frequency High-Power Static Induction Transistor // IEEE Trails, on Electron Dev. 1978. Vol. 25. № 3. P. 314–322.
- Homola I., Milnest A.G. Turn-off-type Field-Controlled Thyristor. Concepts for High Power Operation // Solid-State Electronics. 1980. Vol. 23. № 11. P. 1101–1105.
- Мощные транзисторы со статической индукцией / М. Татта и др. // Тохоку Киндзоку Гихо. 1980. Т. 8. № 1. С. 45–52.
- Юкимото Д. Транзисторы со статической индукцией с присоединённым затвором // Дэнки Дзайре. 1981. Т. 20. № 9. С. 29–34.
- Sixira K. СВЧ-транзисторы со статической индукцией // Хандотай Кэмкюсе Хококу. 1980. Т. 16. № 1. С. 21–27.
- Normally-off type high speed SI-thiristor / Y. Nakamura, H. Tadano, S. Sagiya at al. // International Electron Devices Meet. Sun-Fransisco, Calif. 1982. P. 480–483.
- Ozawa O., Iwasaki H. A Vertical FET with Self-Aligned Ion-Implanted. Source and Gate Regions // Manuscript received Ianury 27, 1977. Revised August 29, 1977. P. 56–57.
- International Electron Devices Meet / A. Cogan, R. Regan, I. Bencuye at al. Washington, 1983. P. 221–224.
- Полевой транзистор с продольным управляющим р-п-переходом: патент 52-3791 Япония: МКИ НОИ 29/80 / Акиясу И. (Япония); Сони К.К. (Япония). № 48-115121; заявл. 13.10.73; опубл. 29.01.77.
- Способ изготовления полевого транзистора с продольным расположением областей. Заявка 58-28782 Япония: МКИ НОИ 29/80/ Сони К. К. № 50-38313; заявл. 28.03.75; опубл. 17.06. 83.
- Shino T., Kamo H., Aoki M. 2 GHz high power silicon SIIs // Proc. 1979 Int. Conf. Solid State Devices (Tokyo) Iap, I. Appl. Phys. Suppb. 1980. Vol. 19. P. 283–287.
- 1 GHz 100 W internally matched Static indution transistor / M. Aiga, Y. Higashi, M. Kato, Y. Kajiwara et al. // Proc. 1979 European Microwave Conf. 1979. P. 561–565.
- Microwaves. 1979. № 11. P. 20.
- Nishizawa I., Ohmi T., Chen H. Analysis of Static Characteristic of a Bipolar-Mode SIT (BSIT) // IEEE Trans, Electron Dev. 1982. Vol. ED-29. № 8. P. 1233–1244.
- Tamama T., Murase K., Mizushima Y. Voltage-Controlled negative resistance in A submicron Vertical IFET // Solid-State Electronics. 1984. Vol. 27. № 10. P. 855–866.
- Способ изготовления полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и вертикальным каналом: авт. свидетельство 1215546 СССР: МКИ НОИ 21/18 / Максименко Ю.Н., Корнилова С.Н., Жуковский Н.М. (СССР). № 3052227; заявл. 22.06.82; зарег. в Госреестре изобр. СССР 01.11.85.
- Антонов М.И., Данилов В.С., Максименко Ю.Н. и др. Мощные полевые транзисторы КП801В, Г, Д с выходными характеристиками триодного типа // Электронная промышленность. 1985. № 7. С. 42–44.
- Усилитель мощности: авт. свидетельство 1270874 СССР: МКИ НОЗ 3/26 / Бессонов Г.К., Семенов Ю.Е., Максименко Ю.Н., Воронцов А.А. (СССР). № 3343424; заявл. 11.01.85; зарег. в Госреестре изобр. СССР 15.07.86.
- Максименко Ю.Н. Мощный транзистор со статической индукцией КП926А, Б // Современная электроника. 2023. № 3.
- Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Додэка – XXI, 2001. 384 с.
- Максименко Ю.Н. Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией с антипараллельным диодом // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).
- Максименко Ю.Н. Мощный полупроводниковый прибор с N-образной вольт-амперной характеристикой // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 4 (267).
- Максименко Ю.Н. Мощный высоковольтный составной транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 4 (267).
- Максименко Ю.Н. Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).
- Максименко Ю.Н., Грабижева В.К. Полностью защищённый транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. Вып. 1 (268).
- Максименко Ю.Н., Грабижева В.К. Можно ли сделать идеальный полупроводниковый ключ? // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. Вып. 1 (268).
- Составной высоковольтный переключающий транзистор: заявка на изобретение от 29.01.86 № 4034830/25 / Максименко Ю.Н., Данилов В.С., Корнилова С.Н., Сергеев А.Г. Решение о выдаче авт. свидетельства от 30.12.86.
- Составной транзистор: авт. свидетельство от 15.09.1989 № 1538831 / Максименко Ю.Н., Криштафович И.А., Фелькер Г.А.
- Составной высоковольтный переключающий транзистор: авт. свидетельство от 22.12.1989 № 1559990 / Максименко Ю.Н., Данилов В.С., Бессонов Г.К.
- Мощный высоковольтный составной транзистор: авт. свидетельство от 15.08.1990 № 1614715 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Агафонов С.М.
- Составной транзистор со статической индукцией: авт. свидетельство от 22.08.1990 № 1616449 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Фелькер Г.А., Пальмихин М.Б.
- Дефензор: заявка на патент от 05.05.2022 № 2022112569/289026205 / Максименко Ю.Н., Глухов А.В., Романюк А.И. Решение о выдаче патента от 10.11.2022.
- Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN // Силовая электроника. 2010. № 5.



ELECTRONICA ПРЕМИЯ

ПРЕМИЯ ELECTRONICA - НЕЗАВИСИМОЕ ЕЖЕГОДНОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ НА ПОДДЕРЖКУ И ПРОДВИЖЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

ПРЕИМУЩЕСТВА УЧАСТИЯ



ВЫБЕРИТЕ КАТЕГОРИЮ И НОМИНАЦИИ ДЛЯ УЧАСТИЯ

МИКРО- ЭЛЕКТРОНИКА

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ ДИЗАЙН-ЦЕНТРОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ТЕХНОЛОГИИ для КИИ

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ВНЕДРЕНИЕ ДОВЕРЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ПЛАТФОРМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ БЕЗОПАСНОСТИ КИИ
- ЗА ВКЛАД В РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОГРАММЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ РОССИИ

ДИСТРИБУЦИЯ

НОМИНАЦИИ:

- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ЭКБ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И СИСТЕМ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АУТСОРСИНГ

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОЙ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗРАБОТКУ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КООПЕРАЦИИ

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВА И МАТЕРИАЛОВ
- ЗА РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

РОБОТОТЕХНИКА

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
- ЗА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ И СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКСОВ

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКБ
- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА СОЗДАНИЕ САПР И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

ПОДГОТОВКА КАДРОВ для ОТРАСЛИ

НОМИНАЦИИ:

- ЗА ПОДГОТОВКУ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ
- ЗА РАЗВИТИЕ НОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ И ИНИЦИАТИВ В РАДИО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ УНИКАЛЬНЫХ КАДРОВЫХ ПРОГРАММ НА СВОЕМ ПРЕДПРИЯТИИ
- ЗА СОЗДАНИЕ КАДРОВОГО РЕЗЕРВА ОТРАСЛИ В РАМКАХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

ЛОКАЛИЗАЦИЯ

НОМИНАЦИЯ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

В РАМКАХ

 EXPO
ELECTRONICA

25-Я ЮБИЛЕЙНАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОНИКИ

11–13 АПРЕЛЯ 2023
МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

ПОДАЙТЕ ЗАЯВКУ

ОНЛАЙН НА
EXPOELECTRONICA.RU

 ITE

ОРГАНИЗАТОР
ORGANISER

Реклама