

Для цитирования: Букашев Ф.И., Шахмаева А.Р. РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ СО СТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ (БСИТ). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;42 (3):34-44. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-34-44

For citation: Bukashev F.I., Shakhmaeva A.R. DEVELOPMENT OF CONTROLLED RECTIFIERS BASED ON THE BIPOLAR WITH STATIC INDUCTION TRANSISTORS (BSIT). Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42 (3):34-44. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-34-44

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.314.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-34-44

Букашев Ф.И.¹, Шахмаева А.Р.²

¹Новгородский государственный университет
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41,
e-mail: boukachev@gmail.com,

²Дагестанский государственный технический университет,
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, e-mail: fpk12@mail.ru

**РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ СО
СТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ (БСИТ)**

Аннотация. Целью исследования является разработка одного из перспективных полупроводниковых приборов, пригодных для создания и совершенствования управляемых выпрямителей, биполярного статического индукционного транзистора. **Методы.** Рассмотрены структурная и принципиальная схемы управляемого выпрямителя на основе биполярного статического индукционного транзистора (БСИТ), а также критерий эффективности управляемых выпрямителей – эквивалентное падение напряжения. **Результат.** Представлены результаты исследований макета управляемого выпрямителя на БСИТ КТ698И; установлена работоспособность макета при входном напряжении от 2,0 В на частоте до 750 кГц. Коэффициент полезного действия исследованных макетов при средних плотностях тока достигает 90%. Предложена оптимизация технологического маршрута изготовления микроселектронного управляемого выпрямителя, включающего БСИТ и интегральные биполярные элементы схемы управления. **Вывод.** Доказано, что наиболее эффективное использование биполярного статического индукционного транзистора имеет место при работе в низковольтных управляемых выпрямителях на частотах 350-400 кГц совместно с низковольтной схемой управления. Обосновано, что повышение функциональных характеристик преобразователей связано, в первую очередь, с расширением диапазонов входного напряжения и выходного тока.

Ключевые слова: транзистор, преобразователь, управляемый выпрямитель, БСИТ-транзистор, МОП-транзистор, технология, напряжение, коэффициент полезного действия

Fedor I.¹ Bukashev, Aishat R.² Shakhmaeva
Novgorod State University

41 d. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya, Veliky Novgorod, 173003,
e-mail: boukachev@gmail.com,

² Dagestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave, Makhachkala, 367015,
e-mail: fpk12@mail.ru

**DEVELOPMENT OF CONTROLLED RECTIFIERS BASED ON THE BIPOLAR
WITH STATIC INDUCTION TRANSISTORS (BSIT)**

Abstract. Aim. The aim of this study is to develop one of the most perspective semiconductor device suitable for creation and improvement of controlled rectifiers, bipolar static induction transis-

*tor. **Methods.** Considered are the structural and schematic circuit controlled rectifier based on bipolar static induction transistor (BSIT), and the criterion of effectiveness controlled rectifiers - equivalent to the voltage drop. **Results.** Presented are the study results of controlled rectifier layout on BSIT KT698I. It sets the layout operation at an input voltage of 2.0 V at a frequency up to 750 kHz. The efficiency of the studied layouts at moderate current densities as high as 90 % . Offered is optimization of technological route microelectronic controlled rectifier manufacturing including BSIT and integrated bipolar elements of the scheme management. **Conclusion.** It is proved that the most efficient use of the bipolar static induction transistor occurs at the low voltage controlled rectifiers 350-400 kHz, at frequencies in conjunction with a low-voltage control circuit. It is proved that the increase of the functional characteristics of the converters is connected to the expansion of the input voltage and output current ranges.*

Key words: transistor, converter, controlled rectifier, BSIT transistor, MOSFET, technology, power, efficiency

Введение. Прогресс современных высокочастотных преобразователей электрической энергии связан с повышением удельных массогабаритных характеристик, повышением рабочих частот и снижением потерь в активных и пассивных компонентах. Снижение потерь энергии в преобразователях является одним из важнейших аспектов, определяющих их энергоэффективность. Существенный вклад в суммарные потери мощности преобразователей с низким выходным напряжением постоянного тока вносят потери в выходном выпрямителе.

Постановка задачи. Для повышения КПД низковольтных преобразователей широко используются синхронные (управляемые) выпрямители с МОП-транзисторами в качестве ключевых элементов. Многие крупные производители серийно выпускают интегральные схемы управления или предлагают готовые решения для создания синхронных выпрямителей, например International Rectifier IR1176 и Fairchild Semiconductors SG6203. Управляемые выпрямители на МОП-транзисторах обладают рядом достоинств, демонстрируя высокий КПД на высоких рабочих частотах.

В то же время, если управляющее напряжение затворов МОП-транзисторов оказывается выше, чем выходное напряжение управляемых выпрямителей, это требует применения специальных синхронизированных схем управления.

Результатом этого и существенным недостатком данных управляемых выпрямителей с низким выходным напряжением является высокая схемотехническая сложность. Помимо синхронных выпрямителей с МОП-транзисторами известен класс управляемых выпрямителей на основе биполярных транзисторов.

Наиболее ранняя известная конструкция преобразователя напряжения - управляемый выпрямитель однофазной двухполупериодной схемы со средней точкой силового трансформатора. Разработано большое число различных вариантов управляемых преобразователей переменного напряжения в постоянное, однако наряду с достоинствами, данные решения обладают рядом недостатков, в первую очередь, недостаточно высоким КПД, ограниченной рабочей частотой и узким диапазоном рабочих напряжений.

Одним из перспективных полупроводниковых приборов, пригодных для создания и совершенствования управляемых выпрямителей, является биполярный статический индукционный транзистор (БСИТ). Принцип действия и первые экспериментальные образцы статических индукционных транзисторов были разработаны японским ученым Джан-ичи Нишидзава (Jun-ichi Nishidzawa) в начале 1950-х годов [1,2,3]. Несмотря на отличие внутренней структуры, с точки зрения электрических характеристик БСИТ подобен биполярному транзистору, отличаюсь от последнего существенно более высоким быстродействием, заметно меньшими потерями в цепи управления и в цепи коммутации, большей областью безопасной работы по причине отсутствия вторичного пробоя [4,5,6].

Важными качествами БСИТ являются низкое входное напряжение управления и малая входная диффузионная емкость, чем обуславливается малая мощность, необходимая для отпирания БСИТ. По проведенной оценке, при частотах выше 300 кГц мощность потерь при переключении у БСИТ ниже, чем у МОП-транзистора того же класса по напряжению и току. Учи-

тывая перечисленные преимущества БСИТ, разработка управляемых выпрямителей на их основе с указанными характеристиками (напряжением от 2 до 3 В и рабочей частотой выше 300 кГц), является актуальной на сегодняшний день.

Методы исследования. Если сравнивать основные электрические характеристики БСИТ 2Т9183А-5 производства ОАО «Элекс» (г. Александров) и современного ему МОП-транзистора аналогичного класса по току и напряжению FQD17N08L производства компании Fairchild Semiconductor, то сравнение типов приборов позволяет выделить преимущества и недостатки БСИТ. Так, для управления БСИТ требуется гораздо меньшее напряжение, чем для управления МОП-транзисторами.

Это позволяет конструировать управляемые выпрямители на меньшее выходное напряжение без вспомогательных источников питания. Достижимая плотность тока на единицу площади структуры БСИТ примерно вдвое превышает аналогичную величину МОП-транзисторов. МОП-транзисторы демонстрируют предельно низкую мощность управления на постоянном токе, однако с ростом частоты переключений мощность управления растет.

Динамические характеристики МОП-транзисторов на порядок превосходят характеристики БСИТ и почти на два порядка – характеристики биполярных транзисторов. Худшие динамические свойства БСИТ, по сравнению с МОП-аналогами, связаны с накоплением заряда носителей в области прямого смещенного р-п перехода «затвор-канал». Мощность в цепи управления БСИТ и МОП-транзисторов сравнивается на частотах 350-400 кГц.

Таблица 1 - Качественное сравнение БСИТ и МОП-транзисторов

Наименование параметра	Типовое значение	
	БСИТ (2Т9183А-5)	МОП
Достигнутая плотность тока структуры	Высокая: 3-10 А/мм ²	Удовлетворительная: 3-5 А/мм ²
Блокировка напряжения	Блокировка в обоих направлениях	Блокировка в одном направлении из-за наличия в структуре паразитного диода сток-исток
Сопротивление открытого транзистора	Отлично – до полутора раз ниже, чем у МОП-транзистора, в зависимости от тока управления	Отлично - при высоких напряжениях затвора, хорошо - при напряжениях затвора, близких к пороговому
Импульсный ток	Высокий	Высокий
Управляющее напряжение	Менее 1 В	От 1,8 до 10 В
Температурная стабильность	Отлично: V_{be} в среднем 2мВ/°С, $R_{ce(sat)}$ в среднем 0,38%/°С	Удовлетворительно: V_{th} в среднем 4-6мВ/°С, $R_{ds(on)}$ в среднем 0,64%/°С
Мощность управления	Удовлетворительно	Отлично - на постоянном токе, удовлетворительно - на высокой частоте
Скорость переключения	Высокая	Очень высокая
Цена на единицу площади структуры	Сравнима	Сравнима

В таблице 1 приведены результаты качественного сравнения параметров БСИТ и МОП-транзисторов.

Качественное сравнение параметров БСИТ и МОП-транзисторов позволяет сформулировать следующие выводы:

- биполярный статический индукционный транзистор представляет собой отдельный тип полупроводникового прибора, обладает характеристиками, подобными характеристикам

биполярного транзистора, отличается более высоким быстродействием, меньшим напряжением насыщения коллектор-эмиттер, более высоким коэффициентом усиления по току;

- преимуществами БСИТ являются высокая плотность тока на единицу площади структуры и низкое напряжение управления;
- преимущества БСИТ делают целесообразным разработку управляемых выпрямителей с низкими выходными напряжениями, при которых управление по затвору МОП-транзисторами затруднено или невозможно, с рабочими частотами от 350-400 кГц.

Таким образом, наиболее перспективным полупроводниковым прибором, пригодным для создания и совершенствования управляемых выпрямителей, является биполярный статический индукционный транзистор (БСИТ). С учетом этого, можно предположить, что наиболее эффективное использование БСИТ имеет место при работе в низковольтных управляемых выпрямителях на частотах 350-400 кГц совместно с низковольтной схемой управления.

Несмотря на отличие внутренней структуры, с точки зрения электрических характеристик, БСИТ подобен биполярному транзистору, но отличается от последнего существенно более высоким быстродействием, заметно меньшими потерями в цепи управления и в цепи коммутации, большей областью безопасной работы по причине отсутствия вторичного пробоя. К числу достоинств БСИТ следует также отнести низкое напряжение управления. В настоящее время по совершенствованию технологии и конструкции БСИТ проводятся исследовательские работы [7,8,9,10].

Основным критерием для управляемых выпрямителей может быть введен критерий эффективности - суммарная мощность потерь в управляемом выпрямителе:

$$P_{dissCR} = I_{вых}(V_{вы} - V_{вых}) + V_{вх}I_y, \quad (1)$$

где $V_{вых}$ – выходной ток управляемого выпрямителя, А; $V_{вх}$, $V_{вы}$ – соответственно входное напряжение и выходное напряжение управляемого выпрямителя, В; I_y – ток потребления управляемого выпрямителя, А.

Введем критерий - эквивалентное падение напряжения управляемого выпрямителя, равное падению напряжения на выпрямительном элементе, выделяющем при равном среднем выходном токе равную тепловую мощность (2):

$$V_{eqCR} = \frac{P_{dissCR}}{I_{вых}} = V_{вы} - V_{вх} + \frac{V_{вх}I_y}{I_{вых}} \quad (2)$$

Предложенный критерий удобен для количественной оценки энергетической эффективности использования данных управляемых выпрямителей по сравнению с диодами в зависимости от диапазона изменения выходного тока и напряжения.

Анализ выражения (2) и проведенный эксперимент показывают, что эквивалентное падение напряжения рассматриваемых управляемых выпрямителей монотонно возрастает с ростом выходного тока и выходного напряжения.

Одной из мер энергетической эффективности выпрямительного диода является прямое падение напряжения при заданном прямом токе.

Усилия разработчиков направлены на его снижение при сохранении высокого быстродействия. Для современных диодов Шоттки прямое падение напряжения достигает 0,5 В и менее. Повышение функциональных характеристик преобразователей связано в первую очередь с расширением диапазонов входного напряжения и выходного тока. Схемотехническая реализация макета управляемого выпрямителя приведена на рис.1 (использован п-БСИТ КТ698И).

В данном макете VT1 – БСИТ КТ698И, VT2 – биполярный транзистор КТ3102Б, VT3 и

VT4 – КТ3107Б, VD1 и VD2 – LL4147, R1 – 1 кОм, R2 – 7,5 Ом, R3 – 22 Ом. Конденсатор C1 емкостью 15 нФ предназначен для поддержания потенциала на базе транзистора VT1 с целью его более быстрого запираания. Здесь реализован метод пропорционально-насыщенного управления биполярным статическим индукционным транзистором [11]. Установлено, что входное напряжение, равное 2,0 В, является нижним рабочим напряжением данного управляемого выпрямителя.

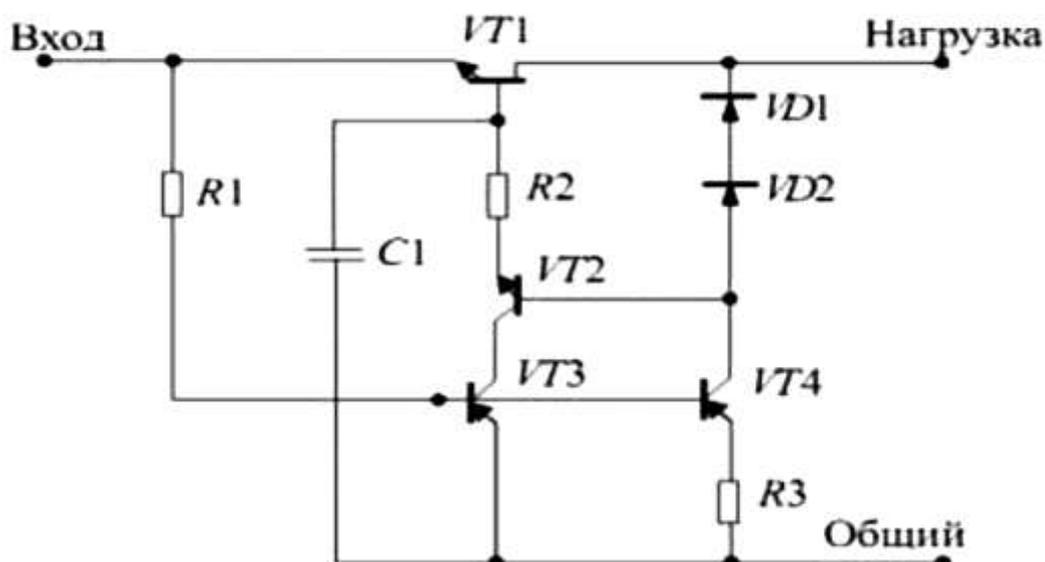


Рисунок 1 - Управляемый выпрямитель с пропорционально-насыщенным управлением БСИТ

Входное переменное напряжение для макета управляемого выпрямителя формировалось при помощи инвертора, собранного на сильноточных МОП-транзисторах. Питание инвертора задавалось при помощи двухполярного регулируемого источника питания со средней точкой, соединенной с общим проводом схемы управляемого выпрямителя. На затворы транзисторов от управляемого генератора подавались прямоугольные импульсы заданной частоты со скважностью, равной двум.

Нагрузкой макетов управляемых выпрямителей являлись мощные безиндуктивные пленочные резисторы. Напряжения и токи измерялись при помощи двухканального цифрового осциллографа. Значения мощности и тока получены посредством численного интегрирования обработанных массивов данных.

Энергетические характеристики управляемого выпрямителя представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Энергетические характеристики управляемого выпрямителя (номинальное напряжение 3,0 В, частота 750 кГц)

Выходной ток, А (действительное значение)	Выходная мощность, мВт	Мощность цепи коммутации, мВт	Мощность цепи управления, мВт	КПД, %	Эквивалентное напряжение, В
0,406	617,0	28,2	19,7	92,8	0,118
0,791	1171,8	101,5	34,3	89,6	0,172
1,161	1685,5	211,7	40,1	87,0	0,217

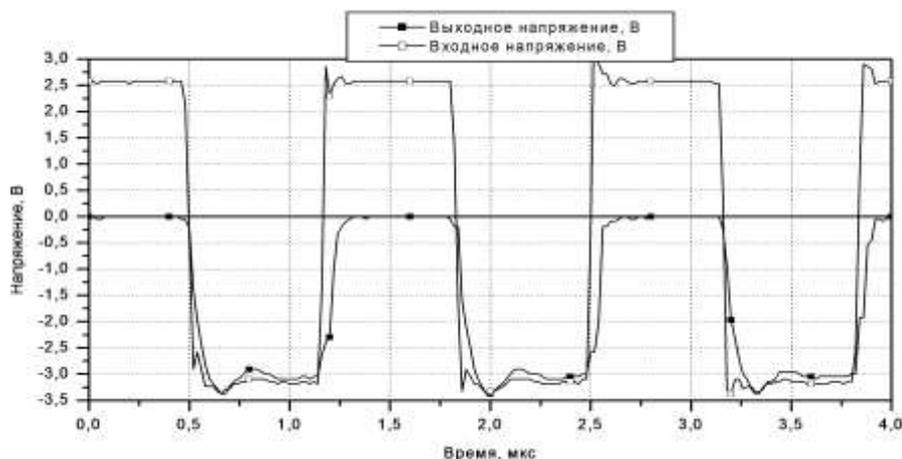


Рисунок 2 - Осциллограммы входного (—□—) и выходного (—■—) напряжения при сопротивлении нагрузки 7,5 Ом и частоте 750 кГц

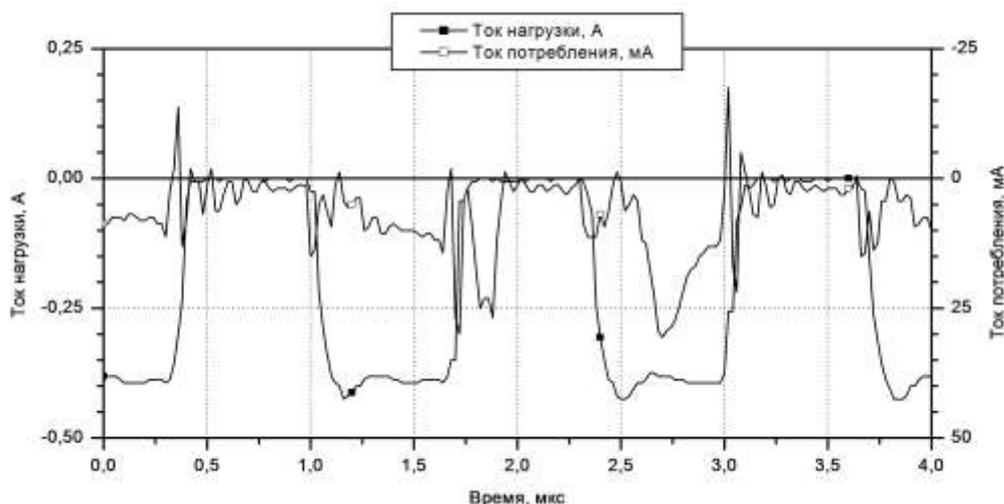


Рисунок 3 - Осциллограммы тока нагрузки (—■—) и тока потребления (—□—) при сопротивлении нагрузки 7,5 Ом и частоте кГц750

На рис. 2 и 3 приведены примеры осциллограмм входного и выходного напряжений, выходного тока и тока потребления на частоте 750 кГц. В таблице 2 обобщены энергетические характеристики управляемого выпрямителя в зависимости от входного напряжения и сопротивления нагрузки. Эквивалентное падение напряжения управляемого выпрямителя также отнесено к фазе проводимости БСИТ.

Микроэлектронная реализация управляемого выпрямителя исследуемого макета (рис.4) может быть реализована в виде интегральной микросхемы.

Схема, показанная на рис.4, является развитием схемы рассматриваемого макета.

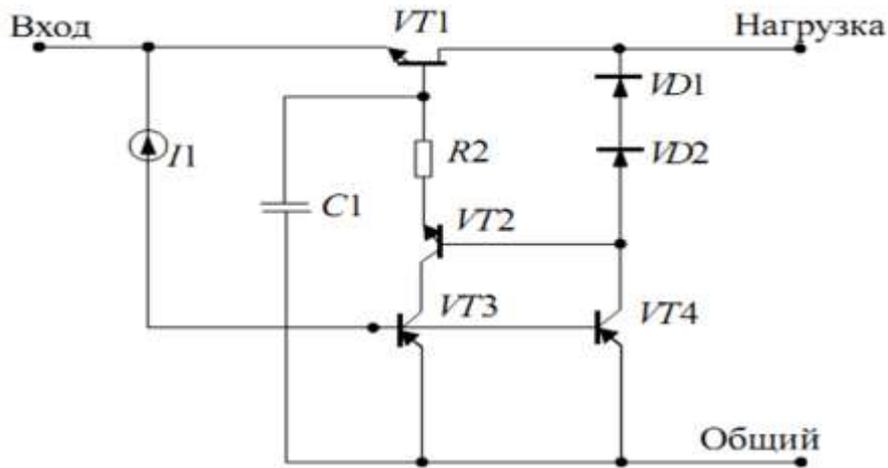


Рисунок 4 -- Вариант микроэлектронной реализации управляемого выпрямителя на основе БСИТ

На данном макете резистор R3 отсутствует, требуемая величина тока коллектора VT4 достигается выбором отношения токов насыщения транзисторов VT3 и VT4. Источник тока I1 может иметь различную природу, например, это может быть резистор или источник тока на биполярных транзисторах. Конденсатор C1 может подключаться извне или быть в составе микросхемы. При проектировании управляемого выпрямителя также желательно увеличить рабочее обратное напряжение база-эмиттер БСИТ.

Обсуждение результатов. На основе оптимизации технологических процессов очистки поверхности пластин, диффузии бора, диффузии фосфора из твердого планарного источника, процесса пирогенного окисления, процессов получения и травления пленки нитрида кремния, металлизации обратной стороны формируемых структур разработан технологический маршрут изготовления структур, состоящий из 62 основных технологических операций. Одна из особенностей технологического маршрута – оптимальный процесс металлизации обратной стороны интегральной структуры.

Металлизация обратной стороны интегральной структуры известными способами может привести к некачественной посадке кристалла на основание корпуса и потере процента выхода годных изделий.

В процессе работы выбрана оптимальная технология металлизации, состоящая из последовательного напыления четырех слоев (хром-никель-олово-серебро) в едином технологическом цикле и обеспечивающая качественную посадку кристалла на основание корпуса, а также увеличение процента выхода годных изделий на 6-10% [12-14].

Особенность предлагаемого процесса можно объяснить тем, что после металлизации проводится посадка кристалла прибора на основание корпуса, однако в случае одновременного присутствия примесей нескольких металлов на обратной стороне кристалла, даже благородных, часто развивается коррозия паяного соединения, приводя к разрушению контакта без всякого воздействия агрессивных сред [13].

Взаимодействие припоя с основой предупреждает барьерный слой никеля. По подслою никеля часто применяют покрытие золота и серебра. Устойчивостью к атмосферному воздействию обладают покрытия оловом, сплавом золото-никель.

Однако на границе припой-золото на деталях могут появляться зоны хрупкого покрытия, разрушающегося при эксплуатации приборов. Серебряные покрытия обладают свойством растворяться в припое с образованием Ag_3Sn и нет данных, позволяющих утверждать, что Ag_3Sn

может вызывать хрупкость, или преждевременные отказы припаяных соединений. Добавка в припой серебра способствует повышению прочности припаяных соединений.

Следовательно, для прочного, надежного монтажа полупроводникового кристалла требуется создание на пластине адгезивной пленки, барьерного слоя, защитного слоя, и слоя, хорошо взаимодействующего с припоем.

Анализ технологических режимов напыления металлов на обратную сторону пластин привел к определенным числовым значениям толщин каждого слоя, наиболее оптимальным с точки зрения качества монтажа кристалла. Хром является первым слоем многослойной металлизации обратной стороны пластин. Его используют, чтобы получить хорошую механическую адгезию с кремнием.

Толщина пленки хрома составляет $500 \pm 100 \text{ \AA}$. Пленка хрома (Cr) не должна иметь толщину менее 300 \AA , в противном случае возможна неравномерность толщины пленки на различных участках пластины и по периферии, однако наращивание пленки более 700 \AA ухудшает электрические и теплопроводные характеристики кремниевых структур. Пленки никеля, используемые для покрытия обратной стороны пластин, характеризуются высоким уровнем механических напряжений.

Для получения хорошей адгезии наносимой пленки необходимо выполнение требований по высокой чистоте обрабатываемых поверхностей пластин относительно углеводородных загрязнений на границах раздела «кремний - хром, пленка хрома - пленка никеля». Кроме того, для выполнения условия хорошей смачиваемости на границе «пленка никеля - пленка олова», необходима высокая чистота этой границы.

Эти условия являются наиболее критичными в процессе нанесения 4-х слойной металлизации, поэтому очень важно проводить процесс в едином технологическом цикле. Пленка никеля (Ni) должна иметь толщину 5000 \AA , потому что после расплавления верхних слоев припой контактирует с никелем и требуется запас толщины для хорошей взаимодиффузии никеля и припоя. Для напыления никеля требуется низкий вакуум порядка 10^{-5} Па, так как никель хорошо окисляется при обычном давлении, а если никель окислился, то его восстановить невозможно.

Толщина слоя олова должна быть в пределах $500-1000 \text{ \AA}$. Олово напыляют для того, чтобы не окислялась пленка никеля при проникновении кислорода через пленку серебра. После посадки кристалла и серебро, и олово будут расплавлены, а припой будет контактировать с никелем. Толщина пленки серебра находится в пределах $4000-10000 \text{ \AA}$.

Данное сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение надежного омического контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание, которое приводит к уменьшению сопротивления омического перехода, что увеличивает процент выхода годных приборов [15,16,17,18].

Вывод. В результате проведенных измерений характеристик макета управляемого выпрямителя на основе БСИТ КТ698И с пропорционально-насыщенным управлением установлена работоспособность макета при входном напряжении от 2,0 В на частоте до 750 кГц.

Коэффициент полезного действия исследованных макетов при средних плотностях тока достигает 90%, а эквивалентное падение напряжения достигает 100-200 мВ.

Критерий – эквивалентное падение напряжения управляемого выпрямителя, равное падению напряжения на выпрямительном элементе, выделяющем при равном среднем выходном токе равную тепловую мощность, удобен для оценки энергетической эффективности использования управляемых выпрямителей по сравнению с диодами в зависимости от выходного тока и выходного напряжения.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Букашев Ф.И., Захарова П.Р. Технология, конструкции, методы моделирования и применение БСИТ-транзисторов/ М.: Академия, 2012.-252 с.
2. Букашев Ф.И. SPICE-модель биполярного статического индукционного транзистора // Известия вузов. Электроника, № 5, 2009. - С. 15-21.
3. Григорьев Б.И. Состояние и перспективы развития теории силовых биполярных транзисторов// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. Спб.: ИТМО, 2016, Т. 59 - № 2, с. 95-106.
4. Лагунович Н.Л., Турцевич А.С., Борздов В.М. Новый технологический маршрут изготовления биполярного транзистора со статической индукцией// МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2016, С.150-151.
5. Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А., Саркаров Т.Э. Технология изготовления транзисторных структур силовой электроники//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. – №1. –Т. 40. -С.31-37.
6. Шахмаева А.Р., Захарова П.Р. Применение САПР SYNOPSIS для моделирования БСИТ-транзистора// Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы материаловедения и наноматериалов: труды VIII Международной конференции.- 9-10 июня 2011.- М: Изд-во МИСиС, 2011.-С.823-828.
7. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Полевой транзистор с длинным каналом со свойствами короткоканального транзистора// Физика и техника полупроводников. М.: Изд. «Наука», 2014.- № 4 - С. 498-503.
8. Захарова П.Р. Исследование и анализ изменения параметров канальной области бсит - транзистора средней высоковольтности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013;29(2):15-21
9. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Захарова П.Р. Технологическое решение по улучшению параметров кристалла биполярного со статической индукцией транзистора// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.-2011.- Т. 20 - №1 - С. 6-10.
10. Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А., Захарова П.Р. Разработка конструктивно-технологических решений создания БСИТ-транзисторов с применением средств приборно-технологического моделирования//Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV международной научно-практической конференции, 4-5 августа 2014 г.– М., 2014.-С. 172-174
11. Шахмаева А.Р., Захарова П.Р. Совершенствование технологии изготовления низковольтного транзистора с наноразмерными величинами активных областей// Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2011.- Т.4 - №16. - С.103-110.
12. Патент 2013100562/28 Рос. Федерация: МПК H01L 21/58, № 2534439; заявл. 09.01.2013;опубл. 27.11.2014 Бюл. №33.-4с. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Захарова П.Р. Способ формирования контакта к стоковой области полупроводникового прибора.
13. Wang, Y., Feng, J., Liu, C. et al. Improvements on voltage-resistant performance of bipolar static induction transistor (BSIT) with buried gate structure. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2012, 55(4): 962.

14. Wang, Y., Feng, J., Liu, C. et al. Improvement on the dynamical performance of a power bipolar static induction transistor with a buried gate structure. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32 (11): 962.
15. Napoli, E. and Strollo, A. G. Static Induction Transistors. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 2014, pp.1–6.
16. Meenakshi Mataray et al. Modern Power Semiconductor Devices. (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, 2012, vol.3, no. 4, pp. 4571 – 4574.
17. Shaohua Lu and Farid Boussaid. An Inductorless Self-Controlled Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting. *Sensors*, 2015, p.15.
18. G. Belkacem1a, S. Lefebvre1, P. Joubert et al. Distributed and coupled 2D electro-thermal model of power semiconductor devices. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2014, 66: 20102.

References:

1. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Bukashev F.I., Zakharova P.R. Technology, Constructions, methods of simulation and application BSIT-transistors. *Moscow: Academy*, 2012, 252 p. (In Russian)
2. Bukashev F.I. SPICE model of the bipolar static induction transistor. *News of higher education institutions. Electronics*, 2009, no.5, pp.15-21. (In Russian)
3. Grigoriev B.I. The state and prospects of further development of theory of power bipolar transistors. *Journal of Instrument Engineering*. St. Petersburg: ITMO, 2016, vol. 59, no.2, pp. 95-106. (In Russian)
4. Lagunovich N.L., Turtsevich A.S., Borzdov V.M. A new process flow of manufacture of the bipolar transistor with static induction. *MNPK "The Modern Information and Electronic Technologies"*. Odessa, 2016, pp.150-151. (In Russian)
5. Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A., Sarkarov T.E. Technology of manufacturing of transistor structures of force electronics. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]*, 2016, vol.40, no.1, pp.31-37. (In Russian)
6. Shakhmaeva A.R., Zakharova P.R. Application of TCAD of SYNOPSIS for simulation of the BSIT-transistor. Perspective technologies, the equipment and analytical systems of materials science and nanomaterials: works of the VIII International conference. June 9-10, 2011. *Moscow: MISIS*, 2011, pp.823-828. (In Russian)
7. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Long-channel field-effect transistor with short-channel transistor properties. *Semiconductors. Moscow: Nauka*, 2014. no.4, pp.498-503. (In Russian)
8. Zakharova P.R. Research and the analysis of change of parameters in the channel of average high-voltage bipolar static induction transistor. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]*, 2013, vol.29, no.2, pp.15-21. (In Russian)
9. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.P., Zakharova P.R. Technology solution on improving of parameters of a crystal of the bipolar with static induction transistor. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]*, 2011, vol.20, no.1, pp. 6-10. (In Russian)
10. Shakhmaeva A.R. Shangereeva B.A., Zakharova P.R. Development of constructive technology solutions of creation of BSIT-transistors using means of instrumental and technological simu-

- lation. The Actual directions of fundamental and applied researches: materials of the IV international scientific and practical conference, on August 4-5, 2014 – Makhachkala, 2014, pp.172-174. (In Russian)
11. Shakhmaeva A.R., Zakharova P.R. Enhancement of manufacturing technology of the low-voltage transistor with nanosized values of the active areas. *Caspian journal. Management and high technologies*.2011, vol. 4, no.16, pp.103-110. (In Russian)
 12. Patent 2013100562/28 Russian Federation: MPK H01L 21/58, No. 2534439; 09.01.2013 is declared; 27.11.2014 is published in Bulletin. no.33, 4p. A method of formation of contact to drain area of the semiconductor device. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Zakharova P. R. (In Russian)
 13. Wang, Y., Feng, J., Liu, C. et al. Improvements on voltage-resistant performance of bipolar static induction transistor (BSIT) with buried gate structure. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2012, 55(4): 962.
 14. Wang, Y., Feng, J., Liu, C. et al. Improvement on the dynamical performance of a power bipolar static induction transistor with a buried gate structure. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32 (11): 962.
 15. Napoli, E. and Strollo, A. G. 2014, Static Induction Transistors. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, pp.1–6.
 16. Meenakshi Mataray et al. 2012, Modern Power Semiconductor Devices. (IJCSIT) International. *Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 4571 – 4574.
 17. Shaohua Lu and Farid Boussaid. An Inductorless Self-Controlled Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting. *Sensors*, 2015, p.15.
 18. G. Belkacem¹, S. Lefebvre¹, P. Joubert et al. 2014, Distributed and coupled 2D electro-thermal model of power semiconductor devices. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 66: 20102.

Сведения об авторах.

Букашев Федор Игоревич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры проектирования и технологии радиоаппаратуры.

Шахмаева Айшат Расуловна – кандидат технических наук, декан факультета повышения квалификации и переподготовки, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Authors information.

Fedor I. Bukashev – candidate of technical Sciences, lecturer of the Department of designing and technology of radio equipment,

Aishat R. Shakhmaeva – candidate of technical Sciences, Dean of Faculty training and re-training, Associate Professor of Department of Software computer technology and automated systems.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.05.2016.

Принята в печать 12.07.2016.

Conflict of interest

Received 30.05.2016.

Accepted for publication 12.07.2016.