

**В.В. Волков, В.Н. Вьюгинов, Ю.С. Кузьмичёв, В.С. Макушина,
С.Н. Морозов, В. А. Петров
ЗАО «Светлана-Электронприбор»**

Разработка карбид-кремниевых рpn-диодов для мощных защитных СВЧ устройств

Представлены результаты разработки конструкции и технологии изготовления серии карбид-кремниевых СВЧ рpn-диодов на основе 4H-SiC структур. Диоды имеют пробивное напряжение 850-900 В при обратном токе 1 мкА, сопротивление (1-5) Ом при 100 мА, ёмкость от 0,35 до 0,03 пФ при обратном напряжении 40В, для разных типов приборов. Время обратного восстановления в режимах I_{пр}/I_{обр} 10мА/10мА зависит от типа прибора и составляет (190-25) нс.

Ключевые слова: карбидкремниевый рpn-диод, защитные СВЧ-устройства

Известно, что разрабатываемые сейчас СВЧ-устройства на кремниевых рpn-диодах обеспечивают время переключения от миллисекунд до единиц наносекунд и переключение СВЧ-мощности от нескольких милливатт до единиц киловатт (в импульсном режиме). При этом рабочая температура кремниевых диодов не может превышать 125°C.

Этот недостаток может быть устранён при использовании карбид-кремниевых рpn-диодов. Достигнутые в настоящее время успехи в технологии получения эпитаксиальных SiC р⁺-ni- n⁺структур и достижения в постростовой технологии позволяют создавать SiC рpn-диоды с рабочей температурой до 500°C [1] [2].

На рис.1 представлена конструкция SiC рpn-диода.

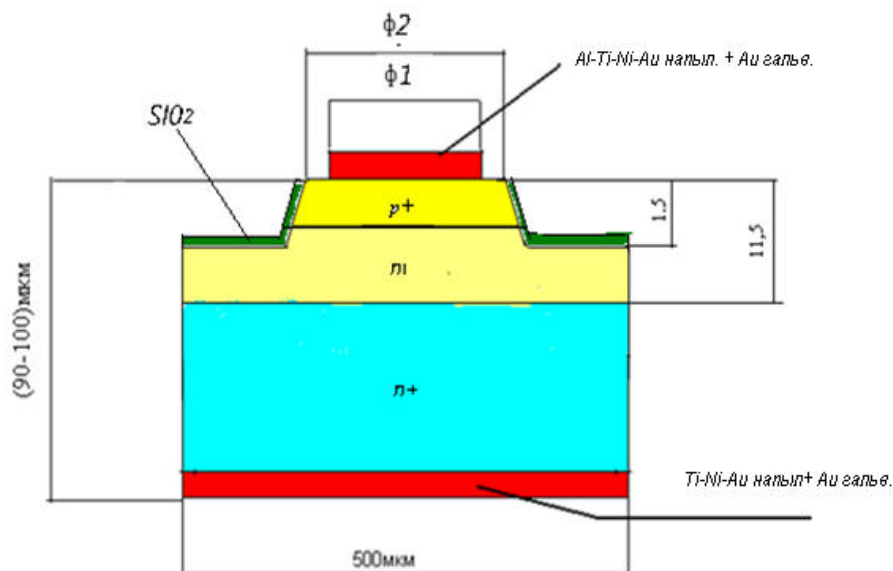


Рисунок 1

Таблица 1

Ø1, мкм	30	45	60	80	90	110	140	190
Ø2, мкм	40	55	70	90	100	120	150	200

Для получения диодов использовались структуры фирмы Ascatron SiC p+-ni- n+
p+ слой $1 \text{ мкм } 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, ni слой $10 \text{ мкм } 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ n+-подложка $0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Технология изготовления данной конструкции включает в себя утонение пластины до 100-110 мкм. Формирование меза-структуры проводится с использованием Al маски 0,4 мкм, в плазме SF₆ +O₂. Выбранный режим травления (0,6 мкм/мин) обеспечивает ровную поверхность, а угол наклона «мезы» составляет 72° к поверхности кристалла. Селективность травления Al маски и SiC 1/6.

Создание омического контакта к p- слою проводится с использованием RCA технологии. При этом после химической очистки поверхности подложки на ней проводится выращивание собственного окисла путём отжига при T=1100°C в атмосфере кислорода в течении 120 мин. На поверхности получается собственный окисел толщиной 10 нм. После проведения процесса фотолитографии для формирования p- контакта этот слой удаляется в буферном травителе, обеспечивая хорошее качество поверхности перед напылением. Дополнительное наращивание плазмохимического SiO₂ проводится в целях создания маски для взрывной фотолитографии, а также как дополнительная защита боковой поверхности.

Формирование верхнего электрода к p- слою проводится методом взрывной литографии с использованием маски SiO₂ + фоторезист. В качестве омического контакта используется металлизация Al/Ti/Ni. Нижний контакт к n- типу формируется напылением сплошного покрытия Ti/Ni. Отжиг обоих контактов проводится одновременно при T=1000°C в течении 120 сек. в вакуумной печи при давлении 10^{-6} Торр . Условия подготовки поверхности, выбор металлизации и метода её нанесения, а также режим термообработки определяют качество омических контактов (контактное сопротивление, адгезия), что во многом определяет параметры диода. Разработанная технология позволяет получать контакты с хорошей адгезией к SiC и с удельным сопротивлением $(6-7) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к p- типу и $1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к n- типу. Измерение контактных сопротивлений проводилось на тестовых элементах, сформированных на пластинах.

Золотое гальваническое покрытие толщиной 3 мкм даёт возможность сборки диода в СВЧ-устройствах методами пайки и сварки. Для обеспечения хорошей адгезии гальванического покрытия к отожжённому омическому контакту предварительно на поверхность контакта наносится металлизация TiAu методом термического напыления.

Все типы изготовленных диодов имели пробивные напряжения 850-900 В при обратном токе 1 мкА.

Прямые ВАХ диодов разных диаметров приведены на рис.2.

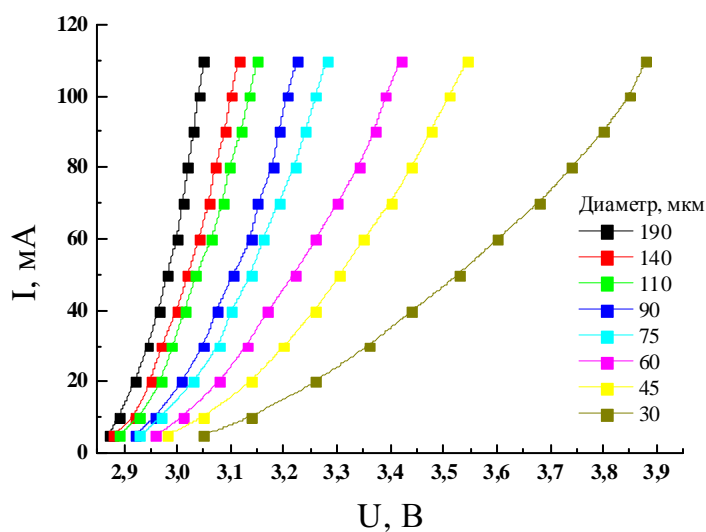


Рисунок 2

На рис.3 представлена зависимость дифференциального сопротивления от площади р- контакта при токе 100мА.

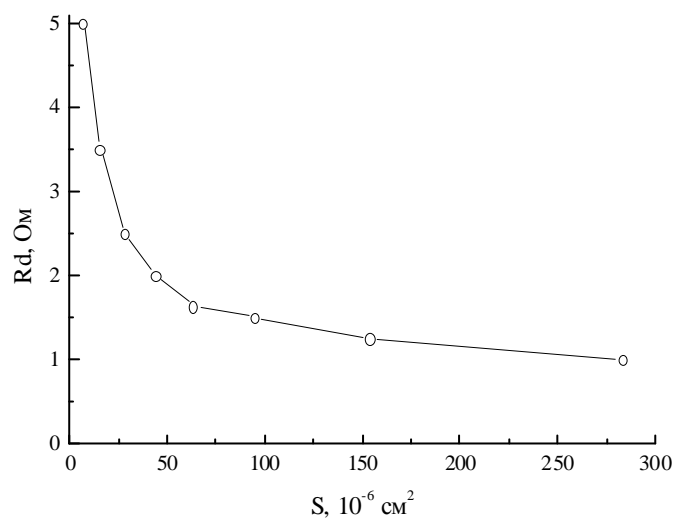


Рисунок 3

Нелинейность характеристики при диаметрах контакта ≤ 60 мкм связана с возрастанием влияния контактного сопротивления на R_d . При изготовлении диодов с размером верхнего контакта $\varnothing 30$ мкм необходимо разработать технологию позволяющую устойчиво получать контакты к р-слою с величиной удельного контактного сопротивления $(1-2) \cdot 10^{-6}$ Ом*см² что является сложной задачей [3] [4].

Результаты измерений ёмкости SiC pin-диодов без корпуса приведены в табл.2.

Таблица 2

U,В	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
С,Пф Ø190	0,76	0,40	0,38	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
С,Пф Ø140	0,55	0,25	0,211	0,205	0,203	0,202	0,201	0,201	0,201	0,201
С,Пф Ø110	0,325	0,15	0,144	0,142	0,141	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
С,Пф Ø90	0,26	0,137	0,128	0,124	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123
С,Пф Ø80	0,16	0,1	0,09	0,087	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085
С,Пф Ø60	0,13	0,081	0,074	0,072	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
С,Пф Ø45	0,08	0,06	0,053	0,052	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051
С,Пф Ø30	0,065	0,043	0,04	0,038	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037

Как видно из результатов измерений в данной конструкции на малых диаметрах большое влияние оказывает краевая ёмкость. Для её снижения необходимо проводить травление более глубокой «мезы» (12-13) мкм. Таким образом возможно снижение ёмкости для диодов Ø30 до 0,02пФ. При этом технология травления (маска, режим травления) должны обеспечивать высокие пробивные напряжения.

На изготовленных диодах измерялось время обратного восстановления в режимах $I_{пр}/I_{обр}=10\text{мА}/10\text{мА}$.

Таблица 3

Ø1, мкм	30	45	60	80	90	110	140	190
τ обр.восст., нсек.	28-30	43-45	60-65	92-95	100-103	120-122	150-153	195-200

Для улучшения быстродействия приборов была опробована технология облучения электронами. При облучениях дозами $3 \cdot 10^{18} \text{см}^2$ происходит деградация прибора (исчезает прямая ВАХ).

Облучение с дозой $2 \cdot 10^{14} \text{см}^2$ не изменяет ВАХ прибора, при этом время обратного восстановления уменьшается \approx в 5 раз. Дальнейший отжиг при температуре 500°C увеличивает этот параметр на (15-20) %. Таким образом возможно существенно увеличить быстродействие приборов.

Изготовленные приборы пригодны для монтажа в СВЧ устройства методами пайки и сварки. В табл.4 приведены расчётные данные теплового сопротивления от р-n перехода до места пайки кристалла [5]. На рис 4 приведена фотография SiC диода.

Таблица 4

Ø1, мкм	30	45	80	90	110	140	190
Ø2, мкм	40	55	90	100	120	150	200
Rth,град/Вт	20,95	15,8	13,5	11,7	9,8	6,7	4,6

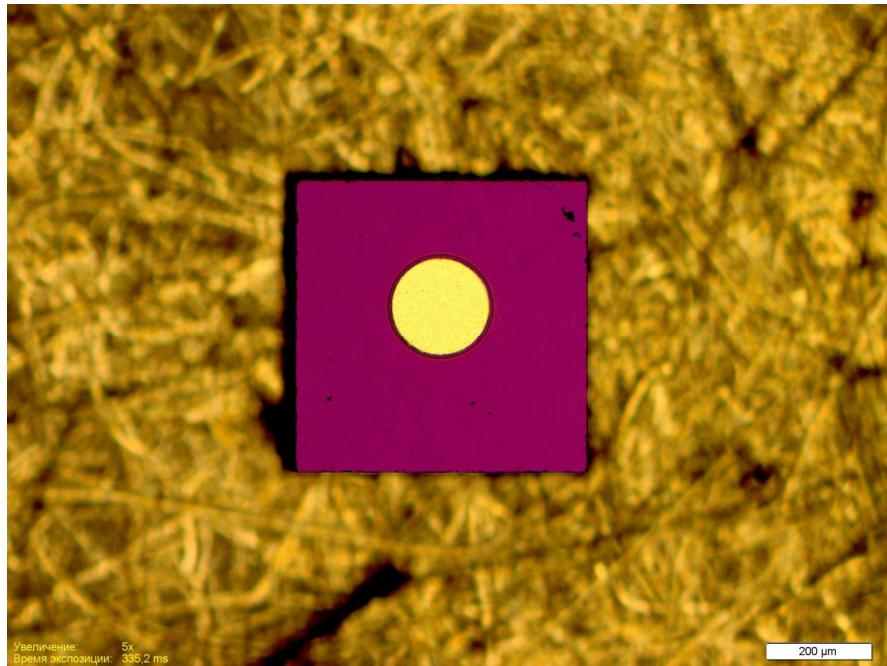


Рисунок 4

Размер кристалла 0,55 мм

Библиографический список

1. Лебедев А, Сбруев С SiC Электроника, Электроника Наука Технология Бизнес 2006 №523-41
2. Басанец В, Беляева А и др Техника и приборы СВЧ 2011 №2 26-28
3. Nakatsuka, Tomonori и др Materials Transactions Vol 43 7(2002)pp1684-1688
4. Т.В. Бланк, Ю.А. Гольберг ФТП 2007 т41 вып. 11 1281-1308
5. П.Б Гамулецкая, А.В Кириллов и др ФТП 2004 т38 вып. 4 504-511