

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
О. А. АБДУЛХАЕВ, А. А. КАРИМОВ, Г. О. АСАНОВА

УДК 621.315.592.2:546.681"19

Узбекистан, г. Ташкент, ФТИ НПО «Физика-Солнце» АНРУз  
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
25.07 2011 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПУСТИМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ $p^+p-n^+$ -СТРУКТУРЫ

*Показана возможность увеличения выдерживаемой прибором мощности за счет уменьшения толщины базовой области для заданной температуры нагрева и скважности импульса.*

Правильный выбор режимов эксплуатации полупроводниковых приборов позволяет продлить срок их службы, предотвратить преждевременный выход из строя. Однако данные о предельных значениях тока и напряжения полупроводниковых приборов, обычно получаемые в стационарном режиме их работы, практически не содержат информации об их реальных предельных режимах эксплуатации. Особенно это касается приборов, используемых в импульсном режиме. В большинстве случаев отказы полупроводниковых приборов на основе кремния вследствие воздействия импульсов тока связаны с перегревом всей кремниевой структуры или какой-то ее части. При этом наблюдается разрушение кремниевой пластины в результате образования «шнура» тока или расплавления контактных областей [1, 2]. Для оценки правильности выбора конструктивных элементов полупроводникового прибора и оптимальных режимов его эксплуатации необходимо знать допустимую температуру активной области в режиме перегрузки, иметь данные о мощности потерь и теплоотводящих свойствах полупроводниковой структуры [3]. Это в определенной степени поможет решить проблему увеличения выдерживаемой прибором мощности. В зависимости от конструкции и типа полупроводникового прибора на основе кремния максимальная температура  $p-n$ -перехода может достигать 125—150°C [4].

В настоящей работе приведены результаты исследования тепловых параметров кремниевой  $p^+p-n^+$ -структуры при воздействии импульсной мощности.

Исследовались кремниевые  $p^+p-n^+$ -структуры, в которых в качестве базовой области использовали монокристаллический кремний  $p$ -типа проводимости, легированный бором, с удельным сопротивлением 0,1 кОм·мм. Толщина базовой области в образцах составляла 250 и 500 мкм. Область  $p^+$ -типа получена диффузией бора из боросиликатного стекла на одну сторону кристалла, а область  $n^+$ -типа — диффузией фосфора на другую сторону. Структуры диаметром 1,5 мм спаивали на посеребренный медный корпус

цилиндрической формы с диаметром 6 мм и высотой 10,3 мм с помощью припоя ПСр-1.5 и серебряных шайб. Второй, верхний контакт — шарик диаметром 1 мм — также спаивался серебряным припоем (рис. 1, а). Вольт-амперная характеристика одной из исследованных структур приведена на рис. 1, б. В режиме прямого смещения в области напряжений от 0 до 0,5 В ток незначителен, а далее он экспоненциально увеличивается до 100 мА при 1,05 В. В режиме запирания до -500 В обратный ток изменяется от 1 до 10 мкА.

На исследуемый диод от генератора подавали положительные прямоугольные импульсы длительно-

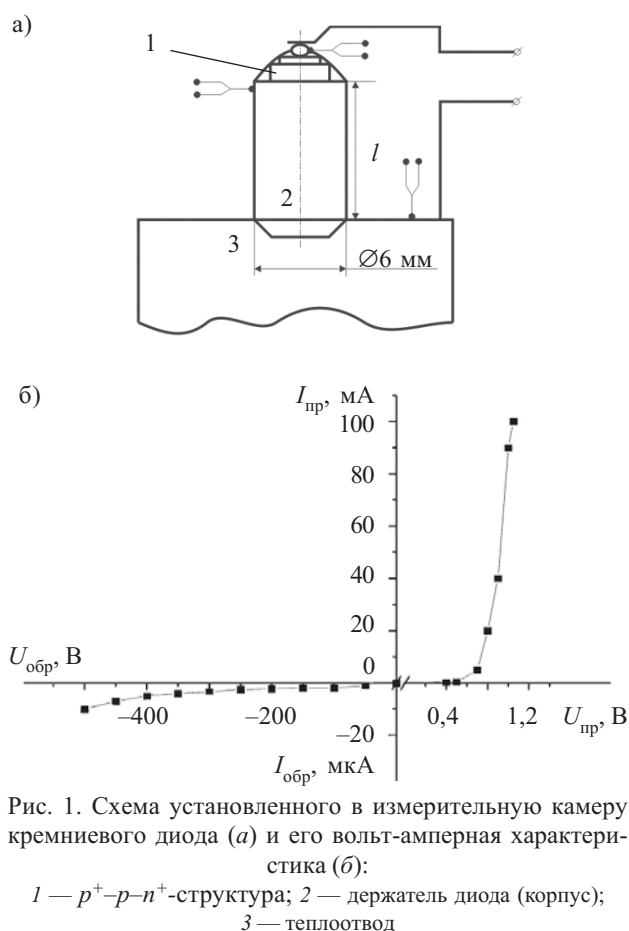


Рис. 1. Схема установленного в измерительную камеру кремниевый диода (а) и его вольт-амперная характеристика (б):

1 —  $p^+p-n^+$ -структура; 2 — держатель диода (корпус);  
3 — теплоотвод

стью 2,5 мкс с частотами 8, 40 и 400 Гц со скважностью 50000, 10000 и 1000 соответственно. Для заданной частоты с шагом 5 кВт увеличивали мощность сигнала  $P$  до 25 кВт. Через некоторое время исследуемый диод переключали в режим измерения температуры перехода  $T_{p-n}$ , которая изначально была равна температуре камеры  $T_{кам}$  (см. рис.1).

В известных методах измерения температуры  $p-n$ -переход диода или транзистора служит в качестве датчика температуры. Для этого диод предварительно калибруют. О температуре судят по падению напряжения на диоде при подаче на  $p-n$ -переход в прямом направлении определенного фиксированного напряжения.

В данной работе падающее напряжение измеряли компенсационным способом. Часть падающего напряжения компенсировали от дополнительного источника тока с напряжением, равным значению падающего при исходной температуре напряжения, а разницу между ними фиксировали милливольтметром. Таким образом осуществляли прямое измерение приращения напряжения.

На рис. 2 показана зависимость величины перегрева перехода  $\Delta T_{п} = T_{p-n} - T_{кам}$  от рассеиваемой мощности для образцов с различной толщиной  $h$  базовой области, откуда видно, что по мере увеличения  $P$  температура перехода нелинейно увеличивается. Это

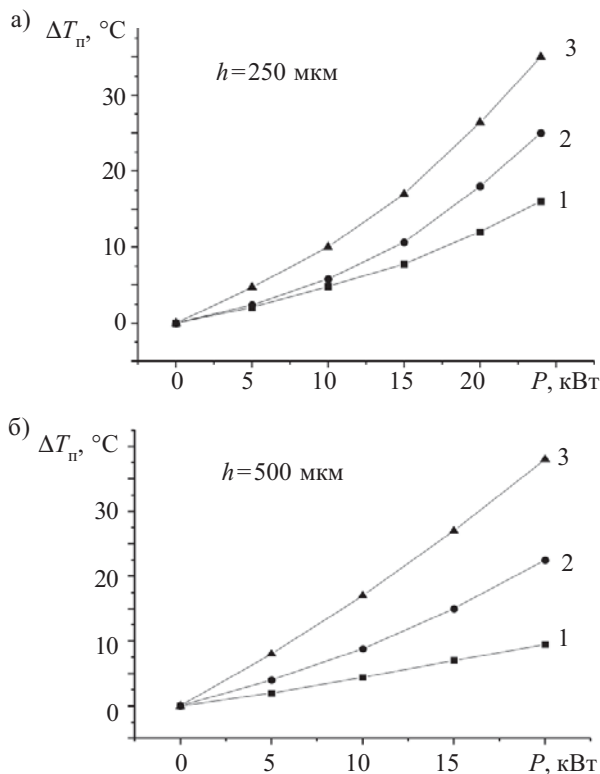


Рис. 2. Зависимость величины перегрева  $p-n$ -перехода для диодов с тонкой (а) и толстой (б) базовой областью от мощности  $p$  прилагаемого импульсного сигнала различной частоты: 1 — 8 Гц; 2 — 40 Гц; 3 — 400 Гц

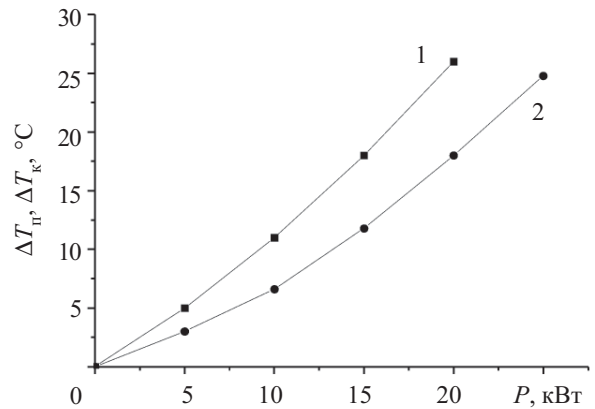


Рис. 3. Зависимость величины перегрева перехода (1) и корпуса (2) от импульсной мощности

можно объяснить неоднородностью токопрохождения, которая становится тем выше, чем выше плотность проходящего тока и чем меньше толщина базовой области. В свою очередь, чем выше плотность протекающего тока, тем больше приращение пикового значения температуры. При этом тепловое сопротивление локальных горячих областей выше, чем тепловое сопротивление всей рабочей площади диода.

Сравнение графиков на рис. 2, а и б показало, что в диоде с толстой базой зависимость приращения температуры перехода от импульсной мощности более близка к линейной, чем у диода с тонкой базой. При этом максимальные значения температуры оказываются примерно на 4°С выше, чем в образцах с тонкой базой, т. е. имеется резерв для дальнейшего увеличения подаваемой мощности [4] и тем более импульсной мощности [5]. Из рисунка также следует, что для заданной мощности импульса при низких частотах (8 и 40 Гц) перегрев перехода больше в образце с тонкой базой, а при больших частотах (400 Гц) — в образце с толстой базой. Соответственно, для работы на больших частотах предпочтительными являются структуры с тонкой базой, а на низких частотах — с толстой. Отсюда следует, что можно повысить допустимую мощность диодной  $p^+-p-n^+$ -структуры не менее чем в полтора-два раза, если подобрать пределы утонения толщины базовой области и увеличения ее площади так, чтобы они не влияли на частотные свойства диода.

Одновременно с температурой перехода с помощью термопары также измеряли температуру корпуса  $T_{кор}$ , которая необходима для вычисления теплового сопротивления кремния. Как показано на рис. 3, величина перегрева корпуса ( $\Delta T_{к} = T_{кор} - T_{кам}$ ) меньше перегрева  $p-n$ -перехода и разница между ними увеличивается с повышением импульсной мощности.

Для диода, установленного в медный корпус диаметром 6 мм, были проведены экспериментально-расчетные исследования для прямоугольного импульса мощностью 360 Вт со скважностью 133, т. е. средняя рассеиваемая мощность  $P_p$  составила 2,7 Вт. Расчеты проводились для  $p-n$ -структуры толщиной 250 и 500 мкм диаметром 1,5 мм при изменении длины корпуса  $l$  от 10 до 1,7 мм. Тепловые сопротивления на

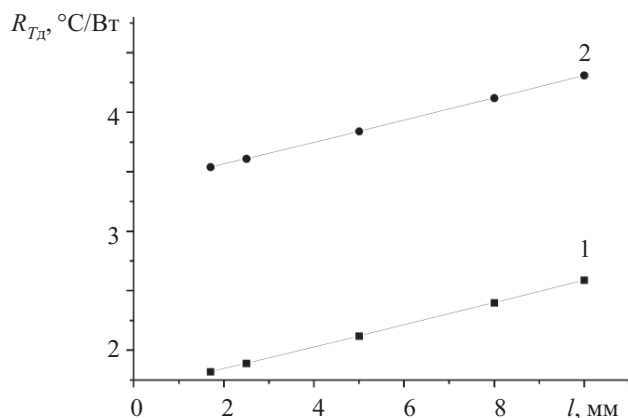


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления диода с тонкой (1) и толстой (2) базовой областью от длины корпуса

участках цепи определяли по формулам, приведенным в [6, с. 151—189].

Расчеты теплового сопротивления диода  $R_{Tд}$  показали, что уменьшение толщины базы, так же, как и укорочение корпуса (рис. 4), приводит к уменьшению  $R_{Tд}$ .

Температура  $p-n$ -перехода связана с величиной рассеиваемой мощности и определяется как [7]:

$$T_{p-n} = T_{oc} + P_p R_T \quad (1)$$

где  $T_{oc}$  — температура окружающей среды;  $R_T$  — тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой (является суммой тепловых сопротивлений между окружающей средой и базовым материалом (Si), корпусом, теплоотводом).

Исследования показали, что максимальная температура  $p-n$ -перехода, которая может быть достигнута в диоде с тонкой базой при указанных выше исходных данных, составляет  $35,25^\circ\text{C}$ , а в диоде с толстой базой  $45,62^\circ\text{C}$ .

Очевидно, что предельно допустимая мощность связана с максимально допустимой температурой  $p-n$ -перехода и, используя формулу (1), ее можно определить как

$$P_{p\max} = (T_{p-n\max} - T_{oc}) / R_T \quad (2)$$

Тогда, с учетом того, что для данной конструкции диода допустимая температура составляет  $125^\circ\text{C}$  [4, с. 466—469], для диода с тонкой базой была получена величина предельной мощности  $16,7\text{ Вт}$ , а для диода с толстой базой —  $10,5\text{ Вт}$ .

\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования тепловых параметров кремниевой  $p^+-p-n^+$ -структуры при воздействии импульсного сигнала показали, что при уменьшении толщины базы пропорционально уменьшается тепловое сопротивление структуры, а зависимость перегрева  $p-n$ -перехода от импульсной мощности приближается к экспоненциальной, что увеличивает выдерживаемую мощность. Так, например, для заданной температуры перегрева уменьшение толщины базовой области от  $500$  до  $250\text{ мкм}$  может значительно (до  $30\%$ ) повысить допустимую мощность диодной структуры.

Полученные результаты могут представлять интерес при оптимизации тепловых режимов высокочастотных импульсных диодов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Матюхин С. И., Ставцев А. В. Моделирование нестационарных тепловых процессов и расчет допустимых токов перегрузки силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника.— 2011.— № 1.— С. 36—42. [Matyukhin S. I., Stavtsev A. V. // Silovaya elektronika. 2011. № 1. S. 36]
2. Гейфман Е. М., Чибукин В. В. Гарцев Н. А., Федосим М. Е. Математическое моделирование и разработка ограничителя напряжения нового типа — высоковольтного ограничителя напряжения // Труды Средневолжского математического общества. — 2005.— Т. 7, № 1.— С. 1—2. [Geifman E. M., Chibukin V. V., Gartsev N. A., Fedosim M. E. Matematicheskoe modelirovanie i razrabotka ogranichatelya napryazheniya novogo tipa – vysokovol'tnogo ogranichatelya napryazheniya. Trudy Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. — 2005. T. 7, № 1. S. 1]
3. Потопов Ю. Тепловое моделирование // EDA EXPERT.— 2002.— Т. 73.— № 10.— С. 60—62. [Potapov Yu. // EDA EXPERT.— 2002. T. 73. № 10. S. 60]
4. Полупроводниковые приборы / Под ред. Н. Н. Горюнова.— М.: Энергоиздат, 1982. [Poluprovodnikovye pribory / Pod red. N. N. Goryunova.— M. Energoizdat. 1982]
5. Беляев А. Е., Басанец В. В., Болтовец Н. С. и др. Влияние перегрева  $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // Физика и техника полупроводников.— 2011.— Т. 45.— Вып. 2.— С. 256—262. [Belyaev A. E., Basanets V. V., Boltovets N. S. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2011. T. 45. Vyp. 2. S. 256]
6. Николаевский И. Ф., Игумнов Д. В. Параметры и предельные режимы работы транзисторов.— М.: Сов. Радио, 1971. [Nikolaevskii I. F., Igumnov D. V. Parametry i predel'nye rezhimy raboty tranzistorov. M. Sov. Radio. 1971]
7. Parrish W. Применение приборов для поверхностного монтажа. International Rectifier. С. 1—4. valvolodin.narod.ru/articles/Ir/An/an-956.pdf.