

К. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, С. М. САВИЦКИЙ,
Р. Б. СОЛТИС, И. Ю. ТИЩЕНКО

Украина, Киевский нац. ун-т им. Тараса Шевченко
E-mail: pps@univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
13.06.2007 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИЗМЕНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ДИОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА УДАРНОГО ТОКА

Исследованы причины выхода из строя кристаллов полупроводниковых силовых диодов при прохождении через них импульсов ударного тока.

Достаточно часто возникает ситуация, при которой мощный блок питания работает на емкостную нагрузку или в режиме короткого замыкания. В этом случае через выпрямительные диоды проходят мощные импульсы тока, которые приводят к деградации параметров диодов, ухудшению надежности их работы или к выходу из строя. Длительность таких импульсов определяется скоростью срабатывания электронной системы защиты от перегрузки. За это время ток не должен превысить значения тока перегрузки $I_{\text{прг}}$ — прямого тока выпрямительного диода, длительное протекание которого вызвало бы превышение максимально допустимой температуры перехода, но который так ограничен во времени, что эта температура не превышает. За время эксплуатации диода число воздействий током перегрузки не ограничивается.

Если же величина тока превысит $I_{\text{прг}}$, через диод пройдет ударный ток $I_{\text{пр уд}}$, при протекании которого превышает максимально допустимая эффективная температура перехода, но который за время службы диода возникает и повторяется редко и вызывается чрезвычайными условиями работы устройства. Этот ток может превышать действующий прямой ток диода $I_{\text{пр д}}$ в десятки раз [1, с. 21, 46—56].

Такая ситуация возникает при сборке диодов методом сварко-пайки [2]. К полупроводниковому кристаллу диода прижимаются облуженные медные выводы, и в прямом направлении через него пропускают ток, разогревающий кристалл до температуры плавления припоя на выводах. Для повышения производительности цикла изготовления диодов сокращают время и повышают ток разогрева. При этом процент выхода годных приборов уменьшается, и надежность их работы ухудшается.

Задачей этой работы было исследование причин выхода из строя кристаллов диодов.

Для этого через кристалл полупроводникового диода пропускались одиночные импульсы ударного тока с регулируемой амплитудой и длительностью. Наблюдались осциллограммы падения напряжения на кристалле, по которым для разных моментов вре-

мени строились вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также рассчитывались зависимости сопротивления кристалла диода $R_{\text{д}}$ и его температуры $T_{\text{к}}$ от длительности $t_{\text{имп}}$ и количества импульсов N ударного тока. При исследованиях использовали постоянный ток, т. к. он позволяет ограничивать выделяемую кристаллом мощность и предохраняет его от выхода из строя [3].

Это связано с тем, что при разогреве полупроводникового кристалла диода в таком режиме сопротивление источника разогрева $R_{\text{и}}$ много больше сопротивления нагрузки (диодного кристалла), т. е. $R_{\text{и}} \gg R_{\text{д}}$. Через кристалл проходит импульс тока I , амплитуда которого не изменяется во время разогрева. Изменяется падение напряжения на кристалле U , которое определяется величиной $R_{\text{д}}$. С увеличением разогрева кристалла его $R_{\text{д}}$ падает, что приводит к уменьшению U , средней выделяемой мощности $P_{\text{ср}} = I^2 R_{\text{д}}$ и к ограничению роста температуры кристалла. Таким образом, реализуется отрицательная обратная связь между температурой полупроводникового нагревателя и приростом выделенной мощности, т. е. происходит саморегуляция выделенной мощности, что позволяет проводить многократные исследования.

В режиме постоянного напряжения при нагревании кристалла его сопротивление падает, ток растет, увеличивается выделенная мощность $P_{\text{ср}} = U^2/R_{\text{д}}$, что приводит к дополнительному росту температуры и т. д. Таким образом, при постоянном времени импульса разогрева реализуется положительная обратная связь между увеличением температуры кристалла и приростом выделенной от этого мощности.

В наших исследованиях измерения в таком режиме не проводились из-за большой вероятности выхода из строя кристаллов диодов.

Исследовались кристаллы выпрямительных диодов средней мощности, указанных в **таблице** [1]. Из приведенных данных видно, что ток перегрузки и тем более ударный ток может превышать средний прямой ток диода в десятки раз.

Исследования показали, что характер изменения параметров и характеристик кристаллов диодов различных марок был одинаков. Поэтому в дальнейшем приведены данные для кристаллов диодов КД208 и длительности импульса 5 мс.

Зависимость температуры кристалла диода от ударного тока и длительности импульса тока

Тип диода	$I_{пр\ ср\ max}$, А	$I_{прг}, (I_{пр\ уд})_{max}$, А	$t_{и}(t_{прг})$, мс	$T_{к\ max}$, °С
КД105	0,3	15	20	125
КД208	1,5	30	20	85
КД209	0,5	15	20	85
КД212	1,0	50	10	125
КД220	3,0	60	10	155
КД202	5,0	30	1500	130
Д231	5,0	50	20	130
КД219	10,0	250	10	115

На рис. 1 показаны осциллограммы прямого падения напряжения на кристалле диода при различных амплитудах тока и разном количестве импульсов ударного тока. При амплитудах импульсов тока ≤ 45 А значение падения напряжения не изменялось как во время импульса, так и при его многократном повторении.

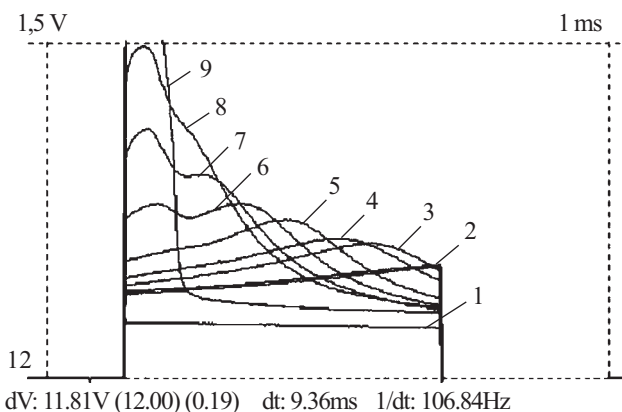


Рис. 1. Осциллограммы падения напряжения на кристалле при разных значениях тока: 1 — 30 А; 2 — 46 А; 3—9 — 50 А

Иная картина наблюдалась при токах ≥ 50 А. При прохождении такого импульса происходил сильный разогрев кристалла, о чем свидетельствует первичный рост, а затем уменьшение падения прямого напряжения на кристалле. Каждый последующий импульс тока с одинаковой амплитудой приводил к увеличению начального прямого падения напряжения (в момент $t=0$), к более быстрому разогреву кристалла и большему изменению U . На осциллограмме кривая 3 соответствует первому импульсу тока, а кривая 9 — седьмому импульсу тока с амплитудой 50 А.

Вольт-амперные характеристики кристалла диода показаны на рис. 2. Кривая $U_{нач}$ построена для начала импульса разогрева, а кривая $U_{кон}$ — для конца. Как видно из графика, при значениях I меньших, чем $I_{пр\ уд}$, ВАХ растет монотонно для начала и имеет S-образный участок для конца импульса. Такой вид ВАХ характерен для изменения сопротивления в результате перегрева [4].

При достижении величины $I_{пр\ уд} \approx 50$ А начинается изменение параметров кристалла при повторении

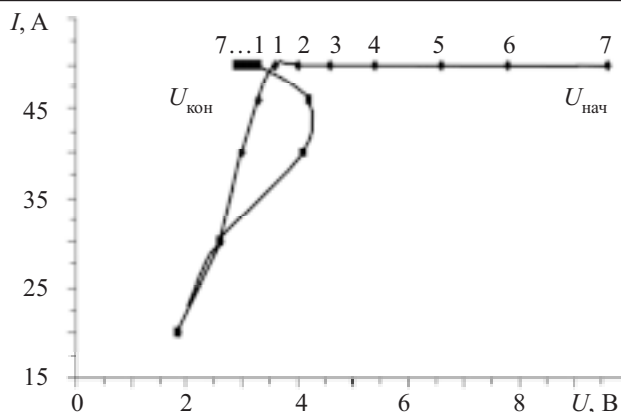


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики кристалла для напряжений начала $U_{нач}$ и конца $U_{кон}$ импульса разогрева

импульса тока. На ВАХ цифрами указан номер импульса тока с одинаковой амплитудой. После седьмого импульса тока кристалл вышел из строя.

Зависимость прямого сопротивления кристалла диода в начальный момент импульса тока от его величины и от количества прошедших импульсов (номера импульса N) показана на рис. 3. Как видно, с увеличением амплитуды тока прямое сопротивление кристалла падает и не зависит от количества импульсов тока ($I=20; 30; 40; 46$ А). При достижении $I_{пр\ уд} \approx 50$ А сопротивление начинает увеличиваться после прохождения каждого импульса $I_{пр\ уд}$. После 7-го импульса тока $I_{пр\ уд}$ прямое сопротивление кристалла увеличилось почти в 3 раза, и он вышел из строя.

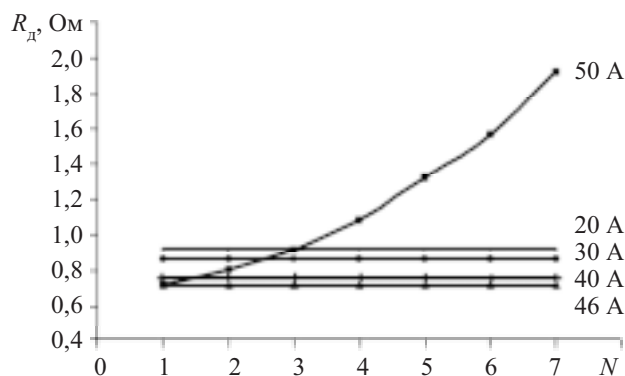


Рис. 3. Зависимость прямого сопротивления кристалла диода R_d от количества импульсов ударного тока (N) при различных амплитудах тока I

Для определения зависимости температуры кристалла диода от времени разогрева была оценена температура кристалла диода при разогреве его одиночными импульсами тока. Оценка проводилась согласно уравнению теплового баланса:

$$\Delta T_k = UIt/cm,$$

где t — время прохождения тока I ;
 c — теплоемкость кремния;
 m — масса кристалла диода.

На время прохождения импульса тока для оценки температуры мы пренебрегаем теплоотбором в окружающую среду и контакты. Это связано с тем, что тепловое сопротивление между кристаллом и

прижимными токоподводящими контактами велико, а теплопроводность воздуха мала по сравнению с теплопроводностью кристалла.

Изменение T_k от времени разогрева показано на **рис. 4**. Кривая 3 соответствует первому импульсу, а кривая 9 — 7-му импульсу тока с амплитудой 50 А.

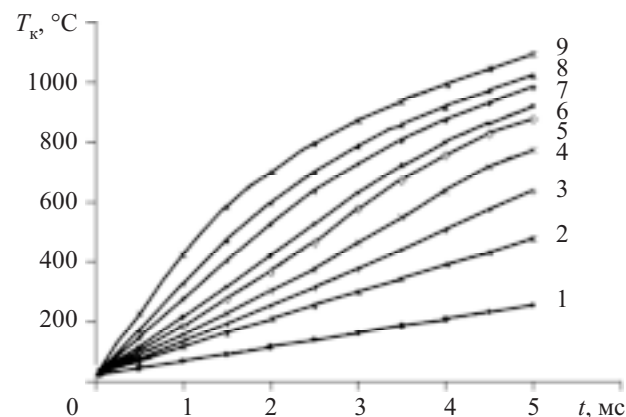


Рис. 4. Зависимость температуры кристалла от длительности импульса тока I с различными амплитудами: 1 — 30 А; 2 — 46 А; 3—9 — 50 А

Как видно, при токах меньше 50 А температура растет почти линейно. При достижении током величины ударного тока рост температуры становится нелинейным. Первоначально температура растет быстро, затем ее рост замедляется и практически останавливается. Необратимые изменения в кристалле наступают после достижения температуры 560°C.

Было проведено исследование зависимости количества импульсов ударного тока от его величины и времени действия. В соответствии с данными [1], время действия импульса прямого граничного тока и ударного тока у большинства силовых диодов изменяется от 1 до 2000 мс. Чем дольше действует импульс тока, тем при меньших его значениях достигается $I_{пр уд}$.

Зависимость амплитуды и числа импульсов ударного тока от длительности импульса показана на **рис. 5**. Как видно, эта зависимость нелинейна. При более коротких импульсах их амплитуда существенно увеличивается, однако количество резко уменьшается.

Исследования показали, что при прохождении ударного тока температура полупроводникового кристалла существенно превышает не только допустимую рабочую температуру, но и температуру его собственной проводимости [4]. Возникший резко неоднородный градиент температуры приводит к возникновению сильных механических напряжений и, как следствие, к появлению дополнительных дефектов (рекомбинационных уровней), приводящих к уменьшению эффективного времени жизни носителей заряда в полупроводнике [5]. Это увеличивает эффективное прямое сопротивление диода, что, в

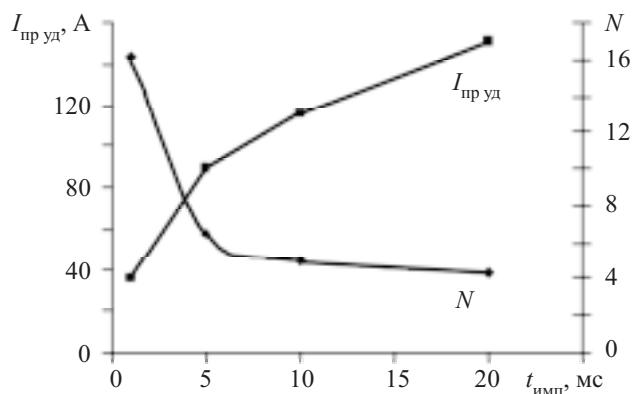


Рис. 5. Зависимость количества импульсов N ударного тока $I_{пр уд}$ от его амплитуды и времени действия

свою очередь, увеличивает выделенную диодом мощность, неоднородно растет его температура, и кристалл полупроводникового диода разрушается.

При токах 30—45 А и длительности импульса 5 мс значение сопротивления как во время действия тока, так и при многократном повторном его воздействии, не изменяется. Температура перехода после прохождения импульса достигает величины $\approx 500^\circ\text{C}$, что меньше температуры собственной проводимости кристалла. Надежность работы такого диода не изменяется.

При значениях $I_{пр уд} \approx 50$ А прямое сопротивление диода растет с каждым повторным импульсом и увеличивается почти в 3 раза, а температура кристалла достигает 1000°C . После 5-го—7-го импульса он выходит из строя.

Выводы

Проведенные исследования показали, что в полупроводниковых диодах при разогревах свыше температуры собственной проводимости под действием импульса ударного тока происходит необратимое увеличение прямого сопротивления кристалла, и диод выходит из строя.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Григорьев О. П., Замятин В. Н., Кондратьев Б. В., Пожидаев С. Л. Диоды. Справочник.— М.: Радио и связь, 1990.
2. А. с. 355696 СССР. Способ сборки полупроводниковых приборов / А. А. Россошинский, В. А. Лебига, В. М. Кислицын, Е. А. Альперович.— 1972.— Бюл. № 31.
3. Павлюк С. П., Ищук Л. В., Кислицын В. М. Саморегуляція виділеної потужності напівпровідникового діодного кристалла // Вісник КУ. Серія фіз.-мат. наук.— 2002.— Вип. 1.— С. 344—347.
4. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
5. Кушниренко В. В., Нинидзе Г. К., Павлюк С. П. и др. Воздействие импульсов прямого тока на время жизни неосновных носителей заряда в p^+-n -диоде // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2007.— № 1.— С. 32—35.