

Г. Г. АФАНАСЬЕВ, В. В. ПАХОМОВ, Г. В. ПЕРФИЛОВ

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СПЛАВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

Если для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры достаточно знать только численные показатели надежности, то для изготовителей диодов главными являются анализ отказов, полученных при испытаниях, определение причин и механизмов, приводящих к отказам, и устранение их путем совершенствования технологии изготовления диодов.

В данной работе приводятся результаты по исследованию надежности серийно выпускаемых диодов типа Д226Б, испытанных в режимах, указанных в таблице:

№ п/п	$U_{обр.}, в$	$I_{выпр.}, ма$	$T^{\circ}C$	Время испытаний, час
1	400	150	20 ± 5	5000
2	400	300	20 ± 5	5000
3	400	600	20 ± 5	5000
4	400	900	20 ± 5	5000
5	400	300	50 ± 1	5000
6	400	300	100 ± 1	5000
7	400	300	150 ± 1	5000

В каждом режиме испытывалось не менее 100 штук диодов. Испытанию подвергались диоды, прошедшие все виды проверок, предусмотренные технологией, и принятые ОТК.

Методика исследования отказавших приборов состояла в измерении электронных параметров и характеристик отказавших приборов; проверке на герметичность на гелиевом течеискателе ПТИ-6; разгерметизации приборов; внешнем осмотре приборов; снятии защитного покрытия и анализ поверхности; измерении электрических параметров; отпайке перехода от кристаллодержателя

теля; проверке качества пайки омического контакта; снятии шлифа, анализе глубины и формы сплавления.

В процессе всех испытаний имели место шесть видов отказов:

1. Короткое замыкание.
2. Обрыв электродов.
3. Деградационное возрастание прямого падения напряжения свыше 1 в.
4. Деградационное изменение прямого падения напряжения с резким увеличением на определенной стадии испытаний.
5. Деградационное возрастание обратного тока свыше норм ТУ.
6. Деградационное изменение обратного тока с резким его увеличением.

В процентном отношении эти виды отказов распределяются следующим образом:

1 — 0,2%; 2 — 0,4%; 3 — 1%; 4 — 2,4%; 5 — 47%; 6 — 49%.

Короткое замыкание. Основной причиной отказа является наличие металлических частиц внутри баллона, образовавшихся в результате выплесков при горячей сварке баллончика с кристаллодержателем.

Обрыв электродов. Он возникает в результате некачественной сварки электродного вывода с компенсатором.

Деградационное возрастание прямого падения напряжения. Большая часть приборов с данным видом отказов имела площадь сплавления кремния с золотом меньше 50%, в местах пайки обнаружены раковины и трещины.

По-видимому, в рабочем состоянии значительно ухудшаются условия теплообмена и происходит сильный разогрев места соединения кристалла с кристаллодержателем, что ведет к нарушению структуры и электрофизических свойств припоя.

Деградационное возрастание обратного тока. 65% приборов, имевших данный дефект, были негерметичны. При их микроанализе на ряде приборов обнаружены трещины и отслоение эмали КО-97 на поверхности кристалла. У ряда негерметичных диодов, не имевших дефектов защитного покрытия, обнаружены микротрещины в месте соединения алюминия с кристаллом.

Часто возрастание обратных токов объясняют образованием инверсионного слоя [1, 2]. Вольтамперная характеристика при этом должна быть логарифмической. Но лишь у 15% приборов характеристики были логарифмическими, 20% приборов имели 2 участка: параболический начальный [2] и близкий к логарифмическому. Самая многочисленная группа приборов имела вольтамперные характеристики, состоящие из линейных, логарифмических и параболических участков. Линейные участки объясняются электролитическим характером токов утечки [3] при малой концентрации ионов примесей.

У диодов, отказавших по деградационному изменению обрат-

ного тока с резким его увеличением, были обнаружены растрескивания эмали и значительные трещины в месте сплавления алюминия с кремнием. Наличие трещин объясняется различием КТР кремния и алюминия при увеличении глубины залегания $p-n$ перехода.

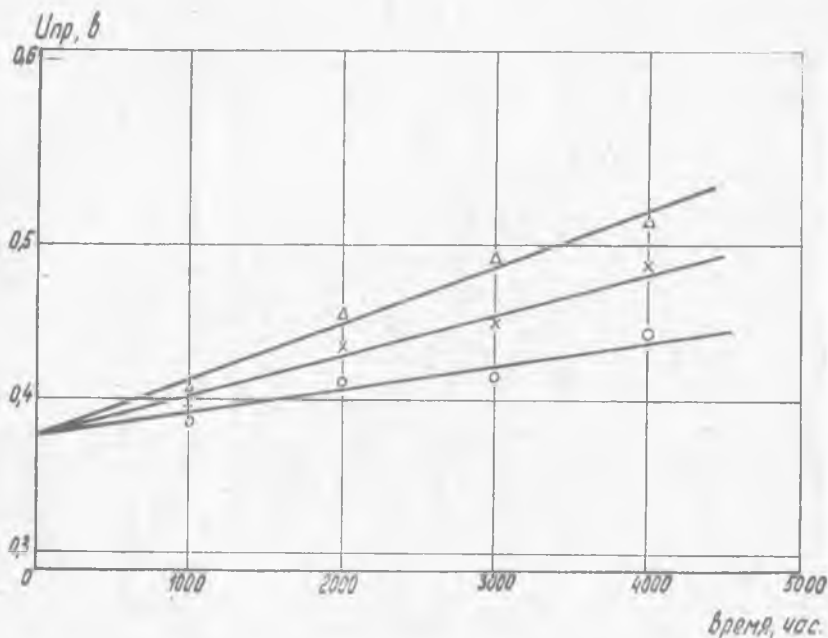


Рис. 1. Зависимость прямого падения напряжения диодов D226Б от времени при работе их в режимах:

- 1— $U_{обр}=400$ в, $I_{выпр}=900$ ма, $T=20\pm 5^\circ\text{C}$;
- 2— $U_{обр}=400$ в, $I_{выпр}=300$ ма, $T=150\pm 2^\circ\text{C}$;
- 3— $U_{обр}=400$ в, $I_{выпр}=300$ ма, $T=20\pm 5^\circ\text{C}$.

У некоторых переходов на фронте рекристаллизации наблюдались нерегулярные выступы, которые могут быть участками больших механических и электрических напряжений приводящих к увеличению обратных токов [4].

Большой практический интерес представляет изучение поведения $U_{пр}$ и $I_{обр}$ диодов в процессе испытаний.

Из рис. 1 видно, что значение $U_{пр}$ со временем возрастает линейно. Скорость нарастания $U_{пр}$ с увеличением нагрузки и температуры увеличивается. Увеличение прямого падения напряжения объясняется старением припоя.

Резкое возрастание $I_{обр}$ (рис. 2) на начальном участке объясняется изменением энергетического состояния поверхности кристалла в результате воздействия паров воды, кислорода и, по-видимому, выделений из защитного покрытия $p-n$ перехода [5].

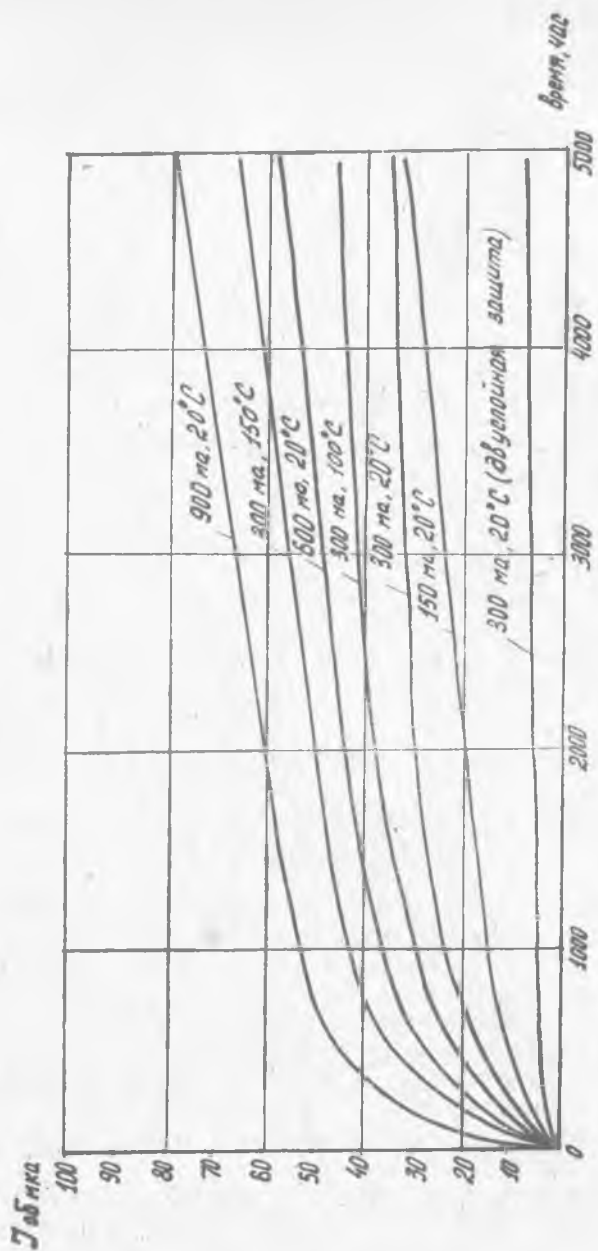


Рис. 2. Зависимость обратного тока диодов Д226Б от времени при работе их в различных режимах

Расчет численных показателей надежности

Для практических расчетов, когда имеется дискретный ряд данных, удобно пользоваться средней интенсивностью отказов $\lambda(t)$.

$$\bar{\lambda} = \frac{F}{Pt},$$

где F — интегральная функция распределения отказов, характеризующая вероятность появления отказа до момента времени t ;

P — вероятность безотказной работы до времени t .

В случае дискретного распределения $F = \frac{\sum n}{N}$,

где $\sum n$ — суммарное число отказов на момент времени t ,

N — число приборов, поставленных на испытание.

Вероятность безотказной работы определяется

$$P = 1 - F.$$

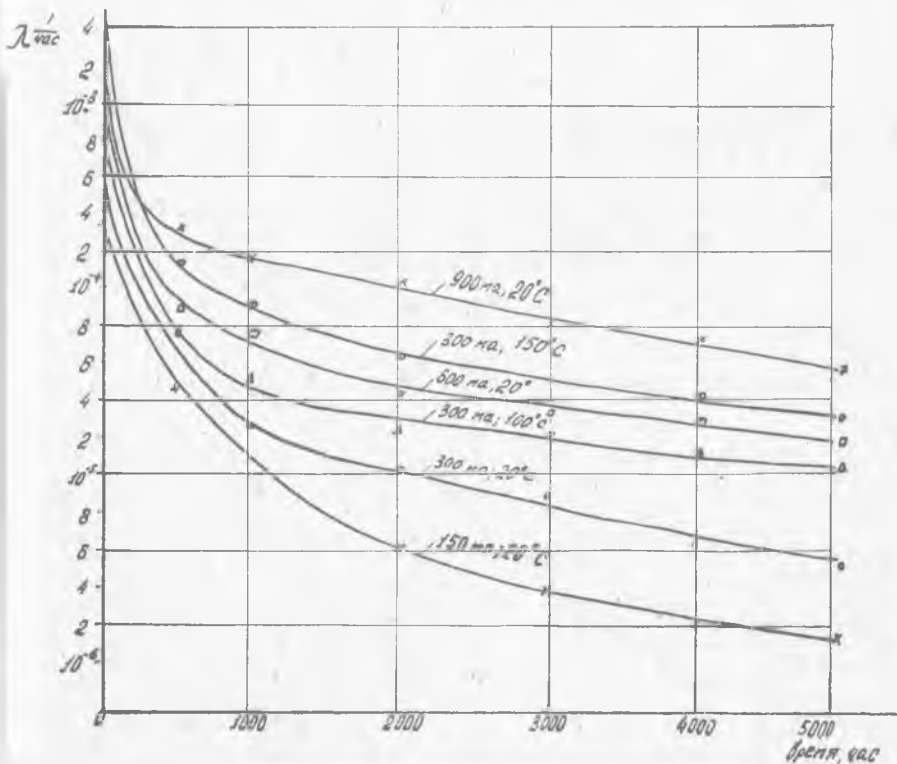


Рис. 3. Изменение величины интенсивности отказов диодов Д226Б в процессе испытаний их в различных режимах

По результатам испытаний были вычислены характеристики надежности диодов для различных режимов испытаний.

На рис. 3 отчетливо наблюдаются участки с повышенной интенсивностью отказов — периоды приработки. Характер изменения зависимости $\bar{\lambda}=f(t)$ указывает на возможность применения для описания закона распределения отказов функции Вейбула.

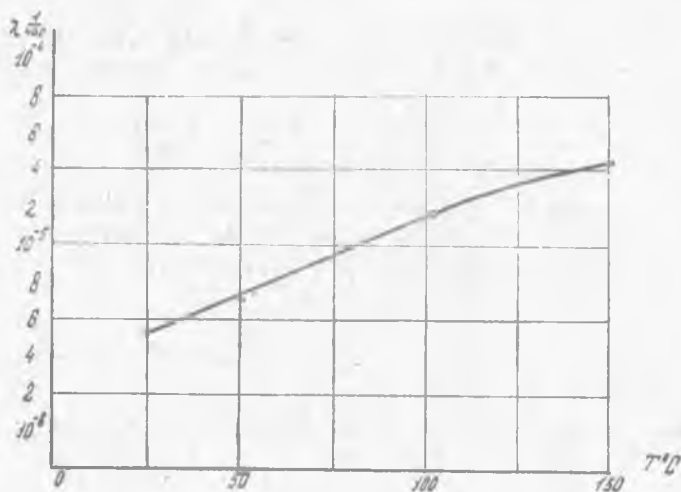


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов диодов Д226Б от температуры окружающей среды при работе их в режиме $U_{обр}=400$ в, $I_{выпр}=300$ ма

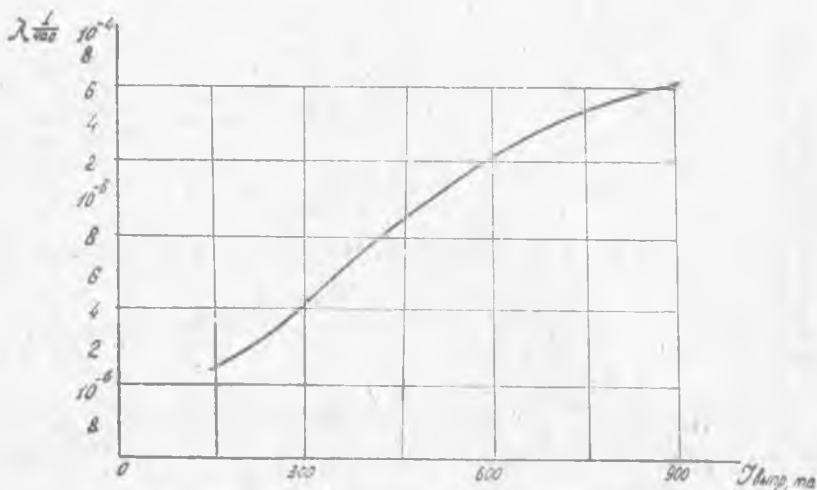


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов диодов Д226Б от величины выпрямленного тока.

На рис. 4 показано, что с увеличением температуры от 25° до 150° С интенсивность отказов возрастает практически линейно.

С увеличением $I_{\text{выпр}}$ от 150 до 900 *ма* интенсивность отказов увеличивается примерно в 25 раз (рис. 5).

По результатам анализа отказов и поведения в процессе испытаний диодов их основных электрических параметров был разработан и внедрен в производство ряд эффективных технологических мероприятий, позволивших улучшить качество и надежность диодов. Например, внедрение в производство высококачественного метода сплавления в вакууме позволило получить высокоповторяемый режим сплавления. Проведение сплавления при температуре, близкой к эвтектической (эвтектика алюминий—кремний), значительно улучшает геометрию фронта сплавления.

Внедрение двухслойной защиты *p-n*-перехода, состоящего из нижней пленки эмали КО-97 и верхней из эпоксидного компаунда ЭКМ-5, позволило повысить выход годных диодов, их термостабильность и снизить величину обратных токов в среднем в 5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Levesque P. I. *Apl. Phys.*, 1956, V. 27, No. 9, p. 1104—1105.
 2. Федорович Ю. В. Диссертация на соискание звания кандидата физико-математических наук. ЛЭТИ, 1964.
 3. Law I., Meigs P. I. *Appl. Phys.*, 1955, V. 26, No. 10.
 4. Рычкова С. В., Верховский Е. И. «Вопросы радиоэлектроники», серия V, «Полупроводниковые приборы», 1963, выпуск 3, стр. 21.
 5. Файнштейн С. М. «Обработка поверхности полупроводниковых приборов», издательство «Энергия», М., 1962, стр. 152—178.
 6. Шор Я. Б. «Статистические методы анализа и контроля качества и надежности», изд. «Советское радио», М., 1962, стр. 362—366.
-