



Patent dodatkowy

do patentu nr _____

Zgłoszono: 24.04.74 (P. 170579)

Pierwszeństwo: _____

Zgłoszenie ogłoszono: 03.11.75

Opis patentowy opublikowano: 20.06.1978

MKP G01r 31/26

Int. Cl.² G01R 31/26

CZYTELNIA

Urzedu Patentowego

Twórca wynalazku: _____

Uprawniony z patentu: Evgenija Iosifovna Model', Anna Sergeevna Savina, Jurij L'vovič Nurov, Aleksandr Nikolaevič Piorunskij, Boris Efimovič Fedorov, Vladimir Michailovič Ivanov, Moskwa (Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich)

**Sposób kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych
i układów scalonych i urządzenie do kontroli jakości przyrządów
półprzewodnikowych i układów scalonych**

1

Wynalazek dotyczy sposobu kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych oraz urządzenia do kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych.

Wynalazek ma zastosowanie głównie do wykrywania potencjalnie zawodnych przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierających złącza p-n, w pośrednich stadiach i w końcowym stadium produkcji, jak również do kontroli dostaw przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych w zakładach produkujących aparaturę elektroniczną, kiedy od aparatury, zawierającej przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone, wymaga się szczególnie dużej niezawodności i trwałości.

Szczególnością wynalazek przedstawia dla kontroli układów scalonych już umieszczonych w obudowach, kiedy nie ma bezpośredniego dostępu do złącz p-n, ale istnieje możliwość dołączenia się do złącz p-n poprzez wewnętrzne obwody rezystywne dołączone do zewnętrznych wyprowadzeń obwodów scalonych.

Znany jest sposób kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych i obwodów scalonych złożonych z co najmniej jednego złącza p-n, polegający

2

na przepuszczaniu przez złącze p-n prądu o zmieniającej się wielkości i na określeniu parametru, z którego można wnioskować o jakości elementów i układów.

5 We wspomnianym sposobie przez złącze p-n przepuszczany jest prąd w kierunku zaporowym i odbywa się pomiar nachylenia napięciowo-prądowej charakterystyki tego złącza. Nachylenie to jest parametrem, z którego wnioskuje się o istnieniu kanałów na powierzchni złącza p-n oraz jego boczniowaniu prądami upływu, to znaczy o jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych zawierających złącza p-n. Jako miary nachylenia używa się stosunku różnicy dwóch spadków napięć U_1 i U_2 na złączu p-n spowodowanych przez dwa znane prądy I_1 i $20 I_2$ płynące przez to złącze, to znaczy:

$$\frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Jednakowoż współczynnik nachylenia charakterystyki prądowo-napięciowej krzemowego złącza p-n w zakresie prądów zaporowych pozwala jedynie w przybliżeniu wnioskować o defektach złącza

p-n z powodu zasadniczego braku odcinka nasycenia, który jest charakterystyczny dla germanowych złącz p-n. Z powodu małej wartości informacyjnej współczynnika nachylenia charakterystyki prądowo-napięciowej krzemowego złącza p-n w zakresie prądów zaporowych jego wykorzystanie do kontroli jakości przez porównanie ze wzorcową charakterystyką prądowo-napięciową jest mało efektywne.

Znane jest urządzenie do realizacji sposobu kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych zawierające generator stałego prądu, do którego za pośrednictwem elementu komutacyjnego dołączone jest złącze p-n elementu półprzewodnikowego lub obwodu scalonego oraz połączony elektrycznie z generatorem prądu rejestrator.

We wspomnianym urządzeniu w charakterze rejestratora wykorzystuje się dwa woltomierze z pamięcią kolejno dołączane do złącza p-n synchronicznie z przepuszczaniem przez nie dwóch zadanych prądów i mierzące spowodowane tymi prądami spadki napięcia na złączu p-n.

W ten sposób urządzenie umożliwia otrzymanie wartości spadków napięć U_1 i U_2 spowodowanych znanymi prądami, odpowiednio I_1 i I_2 , a tym samym obliczenie nachylenia charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n. Jednak nachylenie charakterystyki napięciowo-prądowej stanowi różniczkową oporność złącza p-n w pewnym punkcie charakterystyki w zwykłej, liniowej skali odpowiadają prądowi średniemu $\frac{I_1 + I_2}{2}$.

Sposób polegający na podawaniu na złącze p-n sumy składowej stałej i zmiennej z pomiarem napięcia zmiennego na złączu p-n jest znany. Stosowany bywa do pomiaru oporności różniczkowej złącza p-n i polega na przybliżonym różniczkowaniu jego charakterystyki, napięciowo-prądowej określonej zależnością:

$$U = m \cdot \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right) \quad (1)$$

Po zróżniczkowaniu tego wyrażenia i przejściu do skończonych przyrostów otrzymamy wyrażenie algorytmiczne do wyznaczania oporności różniczkowej:

$$\tau = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m \varphi_T}{I + I_s} \quad (2)$$

lub dla obszaru prądów $I > I_s$:

$$\tau = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m \varphi_T}{I} \quad (3)$$

Przy tym prąd I jest stały podczas pomiaru i wyznacza na charakterystyce napięciowo-prądowej złącza p-n punkt, w którym wykonuje się pomiar τ , ΔI stanowi składową zmienną nałożoną na prąd I , a ΔU — amplitudę składowej zmiennej spadku napięcia na złączu p-n.

W tym przypadku stałość ΔI jest zapewniona w zasadzie w całym zakresie zmian prądu I , dzięki czemu ΔU jest proporcjonalne do τ .

W ten sposób pomiar wielkości τ realizuje się poprzez przepuszczanie przez złącze p-n sumy dwóch prądów — prądu stałego I i nałożonego na niego prądu zmiennego o amplitudzie ΔI i poprzez pomiar, za pomocą dowolnego woltomierza, amplitudy napięcia zmiennego (składowej zmiennej) ΔU , to znaczy spadku napięcia na złączu p-n, która jest proporcjonalna do τ .

Wyżej wspomniano, że nachylenie charakterystyki napięciowo-prądowej, to znaczy oporność różniczkowa jest parametrem o małej wartości informacyjnej, którego stosowanie jest niecelowe.

Celem wynalazku jest usunięcie wymienionych wad.

Zadaniem technicznym wynalazku jest opracowanie sposobu kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i obwodów scalonych na zasadzie pomiaru zależnego od stanu powierzchni złącza p-n i określającego trwałość elementów i obwodów fizycznego parametru złącza p-n, jak również zbudowanie urządzenia do stosowania tego sposobu, którego konstrukcja w połączeniu z wymienionym parametrem zapewniłaby wysoką wiarygodność wyników kontroli i możliwość pomiaru z bezpośrednim odczytem tego parametru fizycznego bez wykonywania obliczeń.

Zadanie techniczne wynalazku zostało rozwiązane w sposobie kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych zawierających co najmniej jedno złącze p-n, polegającym na przepuszczaniu przez złącze p-n prądu o zmiennej wielkości i na wyznaczeniu parametru, z którego wnioskuje się o jakości elementów i układów.

Według wynalazku parametrem, z którego wnioskuje się o jakości jest m-współczynnik odchylenia rzeczywistej charakterystyki napięciowo-prądowej otrzymanej przy przepuszczaniu prądu przez złącze p-n od idealnej zawartej w granicach $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$, gdzie $m_{\min} \leq 1$, $m_{\max} \geq 2$, i przy tym prąd przepływa w kierunku przepustowym. Wielkość prądu zawiera się w zakresie określonym zależnością:

$$U \geq 4 \varphi_T, \quad I < \frac{\varphi_T}{R_b},$$

gdzie:

U — spadek napięcia na złączu p-n

φ_T — potencjał cieplny równy $\frac{kT}{q}$

R_b — oporność obwodu bazy złącza p-n, łącznie z opornością zewnętrzną.

Przepuszczaniu prądu towarzyszy pomiar spowodowanych tym prądem przyrostów napięć na złączu p-n proporcjonalnych do współczynnika odchylenia m . Celowe jest także dobranie kształtu prądu płynącego przez złącze p-n w kierunku przepustowym tak, aby zapewnił on otrzymanie na złączu p-n o idealnej charakterystyce napięciowo-prądowej stałych przyrostów napięcia, których wielkość zmiany jest nośnikiem informacji o wielkości współczynnika m złącz p-n badanych elementów półprzewodnikowych i układów scalonych.

Celowe jest nadanie prądowi płynącemu przez złącze p-n kształtu określonego istnieniem składowej stałej i zmiennej, których stosunek utrzymywany jest na stałej wielkości a o wielkości współczynnika m wnioskuje się na podstawie składowej zmiennej napięcia na złączu p-n.

Korzystne jest nadanie prądowi przepuszczanemu przez złącze p-n kształtu impulsów eksponencyjnych, przy czym impulsy napięcia powstające na złączu p-n poddaje się różniczkowaniu, a o wielkości współczynnika m wnioskuje się z chwilowych wartości amplitudy impulsów otrzymanych w wyniku różniczkowania.

Zadanie techniczne rozwiązane zostało również dzięki temu, że urządzenie do kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierające generator prądowy, do którego za pośrednictwem elementu komutacyjnego dołączone jest złącze p-n elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego i połączony elektrycznie z tym generatorem rejestrator, wyposażone jest w co najmniej jeden dodatkowy generator prądowy, którego wejście sterujące połączone jest z wejściem sterującym podstawowego generatora prądowego i który dołączany jest na przemian z podstawowym generatorem prądowym do złącza p-n, w blok zadawania prądu, którego wyjście dołączone jest do wejść sterujących generatorów prądowych i zgodnie z którego sygnałem synchronicznie zmieniają się prądy na wyjściach generatorów, w połączony równolegle z blokiem zadawania prądu, środek rejestracji średniej wartości prądu przepuszczanego przez złącze p-n oraz w przetwornik napięcia zdejmowanego ze złącza p-n na sygnał elektryczny. Przetwornik napięcia ma współczynnik przetwarzania zależny od kształtu prądu przepuszczanego przez złącze p-n i od średniej wartości tego prądu oraz realizuje połączenie elektryczne między złączem p-n elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego z rejestratorem zapisującym wielkość współczynnika m.

Celowe jest zastosowanie dodatkowego połączenia przetwornika napięcia z wyjściem bloku zadawania prądu.

Korzystnym jest, aby przy przepuszczaniu przez złącze p-n prądu, którego kształt określony jest składową stałą i zmienną, podstawowy i dodatkowy generator prądowy był zrealizowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego, w którego obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest złącze p-n badanego elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego, i połączony z wejściem tego wzmacniacza operacyjnego czwórnika rezystancyjnego, który za pośrednictwem elementu komutacyjnego powoduje przepływ przez złącze p-n dwóch zmieniających się synchronicznie prądów. Blok zadawania prądu zrealizowany jest w postaci generatora napięciowego, a przetwornik napięciowy w postaci wzmacniacza napięcia zmiennego o współczynniku wzmocnienia proporcjonalnym do stosunku średniej wartości prądu do różnicy prądów na wejściu wzmacniacza operacyjnego.

Korzystnym jest, aby przy przepuszczaniu przez złącze p-n prądu w postaci eksponencyjnych impulsów podstawowy i dodatkowy generator prądu był zrealizowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego, w którego obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest złącze p-n badanego elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego i dołączonego do jego wejścia, złożonego z elementów oporowych czynnych i biernych lub z elementów nieliniowych czwórnika, który zapewnia przepływ przez złącze p-n prądu w postaci eksponencyjnych impulsów, przy czym przetwornik napięcia wykonany jest w postaci bloku różniczkowania.

Celowym jest również, aby przy wykonaniu czwórnika z użyciem elementów nieliniowych, blok różniczkowania był wyposażony we wzmacniacz sumacyjny lub różnicowy, którego wejście dołączone jest do wejścia bloku różniczkowania a wyjście — do wejścia rejestratora i, który realizuje dodatkowe sprzężenie elektryczne przetwornika napięcia z blokiem zadawania prądu.

Sposób kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych zawierających złącza p-n według wynalazku zwiększa wiarygodność wyników kontroli oraz pozwala dokonać kontroli układów scalonych zamkniętych w obudowach, do których złącz p-n dostęp bezpośredni częstokroć jest niemożliwy przy stosowaniu innych sposobów kontroli jakości.

Współczynnik odchylenia charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n od idealnej (eksponencyjnej), wybrany w charakterze kryterium jakości odpowiada do sposobu według wynalazku, pozwala na efektywną ocenę stanu powierzchni złącz p-n (istnienia kanałów, warstw inwersyjnych), który wyznacza trwałość elementów półprzewodnikowych i układów scalonych.

Urządzenie według wynalazku nadaje się do konstruowania automatycznych środków kontroli elementów półprzewodnikowych i układów scalonych o przepustowości wystarczającej do zaspokojenia potrzeb produkcji masowej. Urządzenie umożliwia bezpośredni odczyt współczynnika odchylenia m na skali rejestratora, w którego charakterze można zastosować dowolny znany woltomierz typu analogowego lub cyfrowego. Konstrukcja urządzenia według wynalazku jest wyjątkowo prosta, co gwarantuje jego dużą niezawodność i niską cenę.

Wynalazek jest niżej objaśniony na podstawie przykładów wykonania przedstawionych na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia układ blokowy urządzenia do kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, fig. 2 — układ blokowy urządzenia według wynalazku z dodatkowym sprzężeniem elektrycznym przetwornika napięcia z blokiem zadawania prądu, fig. 3 — schemat ideowy pierwszego wariantu wykonania urządzenia z czwórnikiem rezystancyjnym, fig. 4 — schemat ideowy pierwszego wariantu wykonania urządzenia z innym wykonaniem czwórnika rezystancyjnego, fig. 5 — schemat ideowy pierwszego wariantu wykonania urządzenia z czwórnikiem re-

7

zstancyjnym wykonaniem w jego trzecim wariantcie, fig. 6 — schemat ideowy drugiego wariantu wykonania urządzenia, będącego przedmiotem wynalazku z czwórnikiem złożonym z elementów opornościowych czynnych i biernych, fig. 7 — schemat ideowy drugiego wariantu wykonania urządzenia według wynalazku z innym wykonaniem czwórnika złożonego z elementów czynnych i biernych, fig. 8 — schemat ideowy drugiego wariantu wykonania urządzenia z czwórnikiem zrealizowanym na elemencie nieliniowym, fig. 9 — schemat ideowy drugiego wariantu wykonania urządzenia ze wzmacniaczem sumacyjnym realizującym dodatkowe sprzężenie elektryczne przetwornika z blokiem zadawania prądu, fig. 10 — schemat ideowy drugiego wariantu wykonania urządzenia ze wzmacniaczem różnicowym, fig. 11 — schemat ideowy pierwszego wariantu wykonania urządzenia z n-1 generatorami prądowymi.

Dla lepszego zrozumienia istoty wynalazku niżej omówione są jego przesłanki teoretyczne.

Znane są sposoby nieniszczącej kontroli jakości elementów półprzewodnikowych: defektoskopia rentgenowska i w podczerwieni, sposób polegający na ocenie jakości elementów półprzewodnikowych na podstawie parametrów szumowych, sposób kontroli jakości na podstawie kształtu charakterystyki napięciowo-prądowej spolaryzowanych zaporowo złączy p-n elementów półprzewodnikowych.

Elektryczne sposoby kontroli jakości elementów półprzewodnikowych polegające na pomiarze szumowych parametrów ich złączy p-n i badaniu charakterystyk napięciowo-prądowych w obszarze zaporowym dają mało informacji.

Tłumaczy się to tym, że parametry szumowe wykazują złą powtarzalność przy ich ponownych pomiarach. Charakterystyki napięciowo-prądowe spolaryzowanych zaporowo złączy p-n są trudne do normalizacji zwłaszcza dla krzemowych elementów półprzewodnikowych, które nie wykazują z zasady obszaru nasycenia na zaporowej części charakterystyki napięciowo-prądowej.

Wiadomo, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na trwałość elementów półprzewodnikowych jest stan ich powierzchni. Mimo iż parametry szumowe i kształt charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n mają korelacyjny związek ze stanem jego powierzchni, to z wymienionych powyżej przyczyn ocena jakości na podstawie tych parametrów jest utrudniona.

Wiadomo również, że w obszarze przewodzenia złącza p-n jego charakterystyka napięciowo-prądowa nie zgadza się z teoretyczną zależnością eksponencjalną. W szczególności tłumaczy się to tym, że prąd nasycenia złącza p-n zależy nie tylko od składowej generacyjnej, ale i od szeregu innych składowych. Do liczby tych ostatnich należy rekombinacyjna składowa prądu nasycenia silnie zależąca od stanu powierzchni.

Odchylenie charakterystyki napięciowo-prądowej od zależności eksponencjalnej uwzględnia się za pomocą współczynnika odchylenia m, który wprowadzany jest do wykładnika eksponenty znanej

8

zależności opisującej napięciowo-prądową charakterystykę idealnego złącza p-n:

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{m\varphi_T}} - 1 \right), \quad (4)$$

gdzie:

I_s — zastępczy prąd nasycenia,

U — napięcie na złączu p-n,

$\varphi_T = KT/q$ — potencjał termiczny

W związku z tym, że składowa rekombinacyjna wykazuje największy wpływ na kształt charakterystyki napięciowo-prądowej w obszarze małych prądów przewodzenia złącza p-n, zaleca się dokonywanie oceny jej kształtu w obszarze małych prądów przewodzenia.

Obszar ten ogranicza się z góry i z dołu zależnością

$$U \geq 4\varphi_T, \quad I < \frac{\varphi_T}{R_b} \quad (5)$$

gdzie:

U — spadek napięcia na złączu p-n,

R_b — zastępcza oporność w obwodzie bazy złącza p-n, łącznie z opornością zewnętrzną.

Ograniczenie przepuszczanego prądu od dołu do takiej wartości, przy której $U \geq 4\varphi_T$, pozwala na uniknięcie wpływu na wynik badania kształtu charakterystyki napięciowo-prądowej drugiego członu w małym nawiasie zależności (4).

Ograniczenie od góry stosunkiem $\frac{\varphi_T}{R_b}$ pozwala na uniknięcie wpływu spadku napięcia na oporności bazy elementu półprzewodnikowego przy przepływanym przez złącze p-n prądu przewodzenia. Ten spadek napięcia warunkuje nierówność napięcia zewnętrznego i napięcia przyłożonego bezpośrednio do złącza p-n, określając jego charakterystykę napięciowo-prądową przy dużych prądach iniekcji. Wspomniana okoliczność wpływa na przebieg zależności współczynnika m od prądu płynącego przez złącze p-n przy dużych wartościach tego prądu.

Wartość współczynnika m w obszarze małych prądów stanowi dobry środek indykacji stanu powierzchni, co właśnie zaleca się wykorzystywać. Ograniczenie od góry prądu przepuszczanego przez złącze p-n umożliwia kontrolę jakości nie tylko elementów czystopółprzewodnikowych, ale i układów scalonych zawierających złącza p-n oddzielone rezystorami od wyprowadzeń zewnętrznych.

Teoretycznie przy przewodzie składowej rekombinacyjnej, co zachodzi przy małych prądach iniekcji, współczynnik m wynosi 2.

Wtedy, kiedy przeważa składowa generacyjna współczynnik m ma wartość 1.

Tak więc za dobre należy uważać takie elementy półprzewodnikowe lub układy scalone, których współczynnik odchylenia m charakterystyk napięciowo-prądowych ich złączy p-n od charakterystyk napięciowo-prądowych idealnych złączy p-n zawiera się w granicach od 1 do 2.

Właśnie wartości współczynnika m w granicach

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max}, \text{ gdzie } m_{\min} \leq 1, m_{\max} \geq 2$$

są zalecane w charakterze kryteriów oceny stanu powierzchni, to znaczy jakości elementów półprzewodnikowych lub układów scalonych zawierających złącza p-n. Tłumaczy się to faktem, że w wypadku istnienia inwersji powierzchni lub kanałów wielkość m staje się większa od dwóch i mniejsza od jedności. Przy tym w zalecanym obszarze zmienności prądów złączy p-n dla wadliwych złączy występują ekstremalne wartości współczynnika m , dlatego też przy realizacji zalecanego sposobu ważne jest ciągle prowadzenie badania w całym zakresie prądów. Należy wziąć pod uwagę, że bezpośrednie zdjęcie charakterystyki napięciowo-prądowej w zakresie prądów przewodzenia złączy p-n lub jej obserwacja przy użyciu charakterografów daje bardzo niedokładne wyobrażenie o jakości elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego zawierającego złącze p-n w rodzaju „złącze p-n istnieje” lub „nie ma złącza p-n”.

W celu otrzymania informacji o współczynniku odchylenia m zaleca się pomiar przyrostów napięcia na złączu p-n przy zmianie przepływających przez nie, w kierunku przepustowym, prądów.

Przy tym wybiera się taki kształt prądu przepływającego przez złącze p-n, aby zapewniał on otrzymanie na złączu p-n o idealnej charakterystyce stałych przyrostów napięcia, których zmiana zawiera informację o wielkości współczynnika m badanych elementów półprzewodnikowych i układów scalonych.

Konkretnym wariantem realizacji sposobu, będącego przedmiotem wynalazku, jest sposób charakteryzujący się tym, że prąd przepływający przez złącze p-n ma kształt określony składową stałą i zmienną, których stosunek utrzymywany jest na stałej wartości w całym zakresie średniej wartości prądu. Przy tym o wielkości współczynnika m wnioskuje się na podstawie składowej zmiennej napięcia na złączu p-n.

Cechą wyróżniającą sposobu pomiaru współczynnika m według wynalazku, umożliwiającego kontrolowanie jakości złączy p-n, jest to, że utrzymywany jest stały stosunek

$$\frac{\Delta I}{I}. \text{ Wtedy}$$

$$\Delta U = m \varphi_T \frac{\Delta I}{I} = C \cdot m \quad (6)$$

$$\text{gdzie } C = \varphi_T \frac{\Delta I}{I} = \text{const}$$

i w związku z tym ΔU , to znaczy spadek napięcia zmiennego na złączu p-n, jest wprost proporcjonalny do współczynnika m , ponieważ zarówno φ_T , jak i $\frac{\Delta I}{I}$ są stałe.

W ten sposób, jeżeli będzie się mierzyć w sposób ciągły w wyżej omówionym zakresie prąd I i dokonywać pomiaru napięcia zmiennego na złą-

czy p-n, proporcjonalnego do współczynnika m , który nie powinien być mniejszy od $m_{\min}$ ani większy od $m_{\max}$ dla dobrych (potencjalnie trwałych) elementów półprzewodnikowych lub układów scalonych, to można będzie dokonywać efektywnej kontroli ich jakości.

Przy tym w celu dokonania dokładnej kalibracji rejestratora, w postaci na przykład woltomierza napięcia zmiennego, między nim a złączem p-n włącza się wzmacniacz napięcia zmiennego o współczynniku wzmocnienia A wynoszącym:

$$A = \frac{U_{\max}}{N_{\max} \cdot \varphi_T} \cdot \frac{I}{\Delta I}, \quad (7)$$

gdzie $U_{\max}$ — zakres pomiarowy woltomierza napięcia zmiennego a $N_{\max}$ — żądany zakres pomiarowy współczynnika m w jednostkach względnych całkowitych.

Inny sposób bezpośredniego wyznaczania współczynnika m z wielkości zmiany przyrostów napięcia, pod wpływem zmian prądu przepływającego przez złącze p-n, polega na przepuszczaniu przez nie prądu o kształcie impulsów eksponencjalnych. Impulsy napięcia powstające przy tym na złączu p-n są różniczkowane a o wielkości współczynnika wnioskuje się z chwilowych wartości amplitudy impulsów otrzymanych w wyniku różniczkowania.

Podstawą tego sposobu jest fakt logarytmicznej zależności napięcia na złączu p-n od prądu płynącego przez to złącze. Z zależności (3) wynika, że, jeśli prąd I będzie miał kształt określony zależnością eksponencjalną o postaci

$$I = I_0 e^{at}, \quad (8)$$

to spadek napięcia na złączu p-n będzie liniowo zależny od parametru t , na przykład czasu:

$$U = m \cdot \varphi_T \left(\ln \frac{I_0}{I_s} + at \right) \quad (9)$$

W związku z tym po zróżniczkowaniu otrzymamy

$$\frac{dU}{dt} = a \cdot m \cdot \varphi_T \quad (10)$$

Ponieważ a i φ_T są wielkościami stałymi, to pochodna $\frac{dU}{dt}$ jest wprost proporcjonalna do współczynnika odchylenia m . Dla złącza p-n o idealnej charakterystyce napięciowo-prądowej współ-

czynnik $m \neq 1$, dlatego $\frac{dU}{dt} \neq \text{const.}$, co ozna-

cza stałość przyrostów napięcia na złączu p-n spowodowanych przez eksponencjalnie zmieniający się prąd. Dla rzeczywistych złączy p-n współczynnik

$m = 1$ a więc $\frac{dU}{dt} = \text{const.}$ W związku z tym

przyrosty napięcia na rzeczywistym złączu p-n nie są stałe, co świadczy o zmianie współczynnika m , na podstawie którego wielkości wnioskuje się o stopniu wadliwości, to znaczy jakości elementu

półprzewodnikowego lub układu scalonego, zawierającego złącze p-n.

Układ blokowy urządzenia do kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych według wynalazku składa się z generatora prądowego 1 (fig. 1), do którego za pośrednictwem elementu komutacyjnego 2 dołączone jest złącze p-n 3 elementu półprzewodnikowego. Do złącza p-n 3 dołączony jest przetwornik napięcia 4 zamieniający zdejmowane ze złącza p-n 3 napięcie w sygnał elektryczny, przy czym współczynnik przetwarzania tego przetwornika 4 zależy od kształtu przepuszczanego przez złącze p-n 3 prądu i od jego wartości średnicy. Do wyjścia przetwornika 4 dołączony jest rejestrator 5.

Do wejścia sterującego generatora podstawowego 1 dołączone jest wejście sterujące generatora pomocniczego 6 a obydwie wejścia sterujące generatorów 1 i 6 połączone są z blokiem zadawania prądu 7, zgodnie z którego sygnałem zmieniają się synchronicznie prądy na wyjściach tych generatorów 1 i 6.

Równolegle z blokiem zadawania prądu 7, połączony jest miernik 8 do ustalania średniej wielkości prądu płynącego przez złącze p-n 3 i do rejestracji minimalnych i maksymalnych średnich wartości prądu określonych nierównościami (2).

Możliwy jest inny wariant wykonania urządzenia, w którym przetwornik napięcia na sygnał elektryczny jest sprzężony z wyjściem bloku zadawania prądu 7 za pomocą dodatkowego połączenia elektrycznego 10 (fig. 2).

Przy przepuszczaniu przez złącze p-n 3 prądu o kształcie określonym zawartością składowej stałej i zmiennej mającej, w opisywanym wariantcie, postać impulsów prostokątnych — w charakterze generatora podstawowego i dodatkowego 1 i 6 zastosowano wzmacniacz operacyjny 11 (fig. 3), w którego gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest złącze p-n 3 badanego elementu półprzewodnikowego, z dołączonym do jego wejścia czwórnikiem rezystancyjnym 12.

Czwórnik 12 zawiera rezystory 13 i 14 i, za pośrednictwem elementu komutacyjnego 2 wykonanego w postaci przełącznika, powoduje przepływ przez złącze p-n 3 dwóch zmieniających się synchronicznie prądów. Przy takiej konstrukcji generatorów 1 i 6 połączony z czwórnikiem 12 blok zadawania prądu 7 wykonany jest w postaci generatora (źródła) stałego napięcia, a miernik 8 do ustalania średniej wartości prądu złącza p-n 3 — w postaci woltomierza napięcia stałego w ogólnie znanym układzie.

Dołączony do złącza p-n 3 przetwornik napięcia 4 stanowi, w opisywanym wariantcie urządzenia, wzmacniacz napięcia zmiennego zrealizowany na układzie scalonym wzmacniacza operacyjnego 15, w którego gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego włączony jest rezystor 16 a do wejścia dołączony jest rezystor 17 i kondensator 18. Przy tym współczynnik wzmocnienia tego wzmacniacza określony jest stosunkiem oporności rezystorów 16 i 17 i jest proporcjonalny do stosunku średniego (stałego)

prądu złącza p-n 3 do amplitudy składowej zmiennej prądu (różnicy prądów).

Zapisujący wielkość współczynnika m rejestrator 5 w wariantcie urządzenia zrealizowany jest w ogólnie znanym układzie woltomierza prądu zmiennego.

Możliwy jest inny wariant wyżej opisanego urządzenia, w którym przez złącze p-n 3 również jest przepuszczany prąd zawierający składową stałą i zmienną, analogiczny do wyżej opisanego wariantu.

Odmienność jego polega tylko na rozwiązaniu układowym czwórnika 19 (fig. 4) zawierającym szeregowo połączone rezystory 13 i 14. Przy tym równolegle do rezystora 14 dołączony jest element komutacyjny 2 w postaci przerywacza, co jest zaletą takiego wariantu urządzenia.

Możliwy jest trzeci wariant wykonania urządzenia, w którym przez złącze p-n 3 przepuszczany jest prąd zawierający składową stałą i zmienną, również analogiczny do wyżej opisanego wariantu.

Odmienność jego polega również tylko na rozwiązaniu układowym czwórnika 20 (fig. 5) zawierającego rezystory 13, 14 i rezystor 21, przy czym te rezystory połączone są w ten sposób, że tworzą układ T.

Rezystory 13 i 14 połączone są szeregowo i łączą blok zadawania prądu 7 z wejściem wzmacniacza operacyjnego 11, a między nimi włączony jest rezystor 21, który, przez element komutacyjny 2 wykonany w postaci przerywacza, łączony jest periodycznie „z ziemią”.

Zaletą opisanego układu jest możliwość operowania elementem komutacyjnym 2 na potencjałach bliskich potencjałowi „ziemi”.

W opisywanych powyżej trzech wariantach urządzenia przez złącze p-n badanego elementu półprzewodnikowego przepuszczany jest prąd, którego składowa zmienna ma postać impulsów prostokątnych. W tych trzech wariantach może być stosowany prąd o składowej zmiennej w postaci impulsów sinusoidalnych.

Przy przepuszczaniu przez złącze p-n 3 prądu w postaci impulsów eksponencjalnych w charakterze prądowego generatora podstawowego i pomocniczego 1 i 6 stosowany jest wzmacniacz operacyjny 11, w którego gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest złącze p-n 3 badanego elementu półprzewodnikowego, z dołączonym do jego wejścia czwórnikiem 22 (fig. 6) zrealizowanym na opornościowych elementach czynnych i biernych. Jako element bierny w opisanym wariantcie urządzenia zastosowany jest kondensator 23 włączony między dwoma czynnymi elementami-rezystorami 13 i 14 łączącymi wejście wzmacniacza operacyjnego 11 z blokiem zadawania prądu 7. Równolegle do rezystora 14 włączony jest element komutacyjny 2, w którego charakterze zastosowany przerywacz, zapewniający przepływ przez złącze p-n 3 dwóch synchronicznie zmiennych prądów.

W proponowanym wariantcie urządzenia blok zadawania prądu 7 stanowi generator (źródło) napięcia stałego, a miernik 8 do ustalania średniej war-

tości prądu złącza p-n 3 — woltomierz prądu stałego, analogiczny do wyżej opisanego.

Przetwornik napięcia 4 stanowi blok różniczkowania zrealizowany na wzmacniaczu operacyjnym 24, w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączony jest rezystor 25, a do wejścia dołączony jest kondensator 26. Zapisujący wielkość współczynnika m rejestrator 5 w proponowanym wariancie urządzenia jest zestawiony w ogólnie znanym układzie oscyloskopu.

Możliwy jest inny wariant wykonania urządzenia, w którym przez złącze p-n 3 również przepuszczany jest prąd w postaci impulsów eksponencyjnych, analogiczny do wyżej opisanego. Odmienność jego polega na tym, że w charakterze biernego elementu czwórnika 27 (fig. 7) zastosowana jest cewka indukcyjna 28. Przy tym szeregowo z cewką 28, połączony jest rezystor 29. Cechą charakterystyczną jest również i to, że element komutacyjny 2 połączony jest szeregowo z rezystorem 14.

Możliwy jest również trzeci wariant wykonania urządzenia, w którym przez złącze p-n 3 przepuszczany jest prąd w postaci impulsów eksponencyjnych, również analogiczny do wyżej opisanego. Odmienność jego polega na tym, że czwórnika 30 (fig. 8) zrealizowany jest z użyciem elementu nieliniowego, w którego charakterze zastosowana jest dioda 31 o eksponencyjnej zależności prądu od przyłożonego napięcia oraz elementy czynne-rezystory 32 i 33.

Dioda 31 tworzy połączenie szeregowe z rezystorem 32, do którego równolegle dołączony jest element komutacyjny 2, w postaci przerywacza, łączącego wejście wzmacniacza operacyjnego 11 z blokiem zadawania prądu 7. W opisywanym wariancie urządzenia blok zadawania prądu 7 stanowi generator napięcia piłokształtnego zrealizowany w znanym układzie integratora. Jest on zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym 34, w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączony jest kondensator 35, a do jego wejścia dołączony jest generator prostokątnych impulsów prądowych 36, zrealizowany w ogólnie znanym układzie generatora meandra.

Przy tym miernik 8 do ustalania średniej wartości prądu złącza p-n 3 stanowi woltomierz wartości średnich w znanym układzie mostkowym.

Zaletą proponowanego wariantu urządzenia jest to, że dokonuje ono kontroli charakterystyk napięciowo-prądowych elementów półprzewodnikowych w porównaniu z charakterystykami złączy p-n wzorcowych elementów półprzewodnikowych.

Innym wariantem wykonania urządzenia, umożliwiającym kontrolę jakości elementów półprzewodnikowych na podstawie współczynnika odchylenia m od wzorcowej charakterystyki napięciowo-prądowej, zadawanej przez element nieliniowy, jest urządzenie analogiczne do wyżej opisanego. Jego odmienność polega na tym, że przetwornik napięcia 9 (fig. 9) zawiera oprócz zrealizowanego na wzmacniaczu operacyjnym 24 bloku różniczkowania, wzmacniacz sumacyjny 37. Wzmacniacz 37 zrealizowany jest na wzmacniaczu operacyjnym 38,

w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączony jest rezystor 39.

Wyjście wzmacniacza 37 dołączone jest do wejścia bloku różniczkowania, a pierwsze jego wejście przez rezystor 40 połączone jest ze złączem p-n 3. Przy tym drugie wejście wzmacniacza 37 przez rezystor 41 dołączone jest do bloku zadawania prądu 7, realizując tym samym dodatkowe sprzężenie 10 przetwornika 9 z blokiem zadawania prądu 7.

Opisane urządzenie w odróżnieniu od urządzenia przedstawionego na fig. 8 umożliwia otrzymanie na wejściu rejestratora 5 sygnału proporcjonalnego do względnej różnicy współczynników m wzorcowego złącza p-n diody 31 i badanego złącza p-n 3 i do współczynnika m tego wzorcowego złącza.

Możliwy jest inny wariant wykonania urządzenia, analogiczny do wyżej opisanego i wykonującego te same funkcje co wariant poprzedni. Jego odmienność polega na tym, że generatory napięcia 1 i 6 zrealizowane są na wzmacniaczu operacyjnym 42 (fig. 10) z wejściem różnicowym, w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest złącze p-n 3 badanego elementu półprzewodnikowego, i na czwórniku 43 zawierającym diodę 31 dołączonym do odwracającego (—) wejścia wzmacniacza 42. Za pośrednictwem elementu komutacyjnego 2, będącego w opisywanym wariancie przełącznikiem, nieodwracające (+) wejście wzmacniacza operacyjnego 42 okresowo jest, albo dołączone do bloku zadawania prądu 7, albo uziemiane, a wejście odwracające jest uziemione przez diodę 31 o wzorcowej charakterystyce napięciowo-prądowej.

Przetwornik napięcia 9 zawiera, oprócz bloku różniczkowania wykonanego na wzmacniaczu operacyjnym 24, wzmacniacz różnicowy 44 na bazie wzmacniacza operacyjnego 45 z wejściem różnicowym, w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączony jest rezystor 46. Wejście odwracające (—) wzmacniacza 45 połączone jest za pośrednictwem rezystora 47 ze złączem p-n 3 badanego elementu, a nieodwracające wejście (+), za pośrednictwem rezystora 48 i elementu komutacyjnego 2, połączone jest z blokiem zadawania prądu 7, realizując tym samym dodatkowe sprzężenie elektryczne 10.

Warianty urządzeń przedstawione na fig. 9 i 10 mogą być wykonane bez bloku różniczkowania. W tym przypadku wyjście wzmacniacza sumacyjnego lub różnicowego, odpowiednio 37 lub 44 jest bezpośrednio połączone z wejściem rejestratora 5. Przy tym blok zadawania prądu 7 jest źródłem napięcia stałego.

W przypadku, kiedy do kontroli jakości wystarcza ograniczona liczba punktów na charakterystyce napięciowo-prądowej złącza p-n, w których kontroluje się wielkość współczynnika odchylenia, zaleca się stosowanie wariantu z dodatkowymi generatorami prądowymi, których liczba jest większa od jedności, jednak ograniczona. Wariant ten jest analogiczny do wariantu przedstawionego na fig. 3. Jego odmienność polega na tym, że element komutacyjny 2 (fig. 11) w czwórniku 50 zre-

alizowany jest w postaci wielopozycyjnego przełącznika mającego n pozycji. W tym wariancie wzmacniacz operacyjny 11 wraz z rezystorem 51 czwórnika 50 tworzy podstawowy generator prądowy 1, a z rezystorem 52 tego czwórnika — jeden z dodatkowych generatorów 6 prądu. Przy tym przedstawione na fig. 11 linia przerywaną rezystory w liczbie $n-2$ tworzą ze wzmacniaczem operacyjnym 11 $n-2$ generatorów dodatkowych. Wielkości oporności wspomnianych rezystorów są dobrane tak, że wielkości prądów generatorów prądowych umożliwiają otrzymanie stałych przyrostów napięć na złączu p-n 3 o idealnej charakterystyce napięciowo-prądowej przy komutacji dwóch rezystorów o sąsiednich wartościach oporności.

Wszystkie wyżej opisane konkretne warianty wykonania urządzenia do kontroli jakości elementów półprzewodnikowych nadają się również do badania układów scalonych.

Urządzenie do kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierających co najmniej jedno złącze p-n, działa w sposób niżej opisany.

Element komutacyjny 2 (fig. 1) periodycznie dołącza do złącza p-n 3 generatory prądowe 1 i 6 o różnych wartościach prądów na ich wyjściu.

W rezultacie przez złącze p-n 3 przepływa prąd

$$I = \frac{I_1 + I_6}{2} \quad (I_1 \text{ i } I_6 - \text{prądy}$$

na wyjściach odpowiednio generatora 1 i 6) z nałożoną nań składową zmienną, której wartość międzyszczytowa jest równa różnicy prądów $I_1 - I_6 = I$. W wyniku tego, że generatory 1 i 6 mają wspólny blok zadawania prądu 7, przy zmianie prądu generatora 1 zawsze utrzymywany jest

$$\text{stały stosunek } \frac{\Delta I}{I} \text{ i w związku z tym amplituda}$$

składowej zmiennej ma wartość wynikającą z zależności (6). Inaczej mówiąc, jak wykazano powyżej, amplituda składowej zmiennej jest proporcjonalna do współczynnika odchylenia charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n 3 badanego elementu półprzewodnikowego. Za pomocą miernika 8 do ustalania średniej wielkości prądu 1 wartość tego prądu utrzymywana jest w granicach określonych nierównościami (2).

Na przykład ze wskazań rejestratora (fig. 3—5) wykonanego w postaci woltomierza napięcia zmierzonego, wykalibrowanego w jednostkach względnych, wnioskuje się o wielkości współczynnika m i, jeśli jego wartości nie zawierają się w przedziale między 1 i 2, to element półprzewodnikowy lub układ scalony uważany jest za wadliwy i podlega wysortowaniu.

Konkretny wariant wykonania urządzenia realizującego sposób kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, w którym przez złącze p-n 3 przepuszczany jest prąd stały z nałożoną nań składową zmienną, działa w następujący sposób.

Kiedy element komutacyjny 2 wykonany w postaci przełącznika znajduje się w górnym położeniu, do wejścia wzmacniacza operacyjnego 11 do-

prowadzany jest prąd określony ilorazem dzielenia wielkości napięcia na wyjściu bloku zadawania prądu 7 przez wielkość oporności rezystora 13. Bezpośrednio do wzmacniacza operacyjnego 11 prąd ten praktycznie się nie odgałęzia na zasadzie występowania „wirtualnej ziemi” na wejściu tego wzmacniacza operacyjnego 11, w którego gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego włączone jest podlegające sprawdzaniu złącze p-n 3.

Na tej zasadzie prawie cały prąd przepływający przez rezystor 13 przepływa również przez złącze 3, co jest równoważne dołączeniu złącza p-n 3 do generatora prądowego 1. Kiedy przełącznik znajduje się w dolnym położeniu, szeregowo z rezystorem 13 włącza się dodatkowo rezystor 14 i zmniejsza się prąd na wejściu wzmacniacza 11. W związku z tym skokowo zmniejsza się również prąd przepływający przez złącze p-n 3, co jest równoważne dołączeniu go do generatora prądowego 6.

Ponieważ w obu przypadkach prądy są określone przez to samo napięcie na wyjściu bloku zadawania prądu 7, to przy zmianie tego napięcia prądy będą zmieniać się synchronicznie. Dzięki temu

$$\text{będzie się utrzymywać stały stosunek } \frac{\Delta I}{I}.$$

Napięcie na złączu p-n 3, które praktycznie jest równe napięciu na wyjściu wzmacniacza operacyjnego 11, ponieważ napięcie na jego wejściu jest bliskie zeru przy dostatecznie dużym jego współczynniku wzmocnienia, będzie na mocy powyższych zależności proporcjonalne do współczynnika m .

Działanie urządzeń, których schematy blokowe przedstawione są na fig. 4 i fig. 5 praktycznie nie różni się od działania urządzenia przedstawionego na fig. 3. We wszystkich tych urządzeniach przetwornik napięcia 4 stanowi wzmacniacz napięcia zmiennego o współczynniku wzmocnienia określonym zależnością (7), przez co osiąga się łatwość kalibracji rejestratora 5, który w tym przypadku zrealizowany jest w postaci woltomierza prądu zmiennego.

Przy stosowaniu czwórnika rezystancyjnego 19 (fig. 4) z dwoma szeregowo połączonymi rezystorami 13 i 14, w charakterze elementu komutacyjnego stosuje się przerywacz (klucz), co upraszcza praktyczną realizację urządzenia według wynalazku.

Jeśli w czwórniku 20 (fig. 5) stosuje się trzy rezystory 13, 14 i 21, to przerywacz (klucz) 2 może pracować przy niskich potencjałach względem ziemi, co umożliwia zastosowanie tranzystora w charakterze przerywacza.

Przy realizacji sposobu kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierających złącze p-n, za pomocą urządzeń, w których wykorzystuje się prąd o kształcie eksponencyjnym, może być stosowany kondensator 23 (fig. 6). Urządzenie to działa w sposób następujący: Kiedy element komutacyjny 2 wykonany jako przerywacz jest zamknięty, przez złącze p-n 3 płynie prąd określony przez rezystor 13 i stałe napięcie bloku zadawania prądu 7, co odpowiada urządzeniu na fig. 3, w którym przełącznik znaj-

duje się w górnym położeniu. Przy tym kondensator 23 ładuje się do napięcia na wyjściu bloku zadawania prądu 7. Kiedy przerywacz się rozwiera, kondensator 23 rozładowuje się eksponencjalnie ze stałą czasu określoną wielkością jego pojemności i wartości oporności rezystorów 13 i 14.

Napięcie rozładowania kondensatora 23 powoduje powstanie na wejściu wzmacniacza 11 zmieniającego się eksponencjalnie prądu, który, nie odgałęziając się do wejścia wzmacniacza operacyjnego 11, przepływa przez złącze p-n 3. Na końcu rozładowania prąd płynący przez złącze p-n 3 określony jest przez oporności rezystorów 13 i 14, co zapewnia przepływ przez złącze p-n 3 minimalnego prądu, powodującego spadek napięcia w kierunku przewodzenia rzędu 4φ , zgodnie z nierównością (5). Przy tym wielkość napięcia na wyjściu bloku zadawania prądu 7 jest dobrana tak, aby górna wartość prądu nie była wyższa od wartości określonej nierównością (2). Oczywiście jest, że gdyby charakterystyka napięciowo-prądowa złącza p-n 3 była eksponencjalna, to na wyjściu wzmacniacza 11 (to znaczy na złączu p-n 3) występowałyby liniowe zmiany napięcia w czasie. Jednak z powodu niezgodności charakterystyki złącza p-n 3 z charakterystyką eksponencjalną zmiany napięcia w funkcji czasu na wyjściu wzmacniacza 11 będą różne od liniowych.

Dlatego po różniczkowaniu w bloku różniczkowania 4 na jego wyjściu powstają impulsy, których przebieg amplitudy w funkcji czasu jest powtórzeniem przebiegu zależności współczynnika m od wielkości prądu złącza p-n 3. Do rejestracji wielkości współczynnika m w opisywanym urządzeniu w charakterze rejestratora 3 stosowany jest oscylograf, a może również być stosowany woltomierz stroboskopowy do pomiaru chwilowych wartości amplitudy impulsów, powstających na wyjściu bloku różniczkowania 4.

Urządzenie przedstawione na fig. 7 działa analogicznie do wyżej opisanego. Różnica polega tylko na tym, że eksponencjalny impuls prądu powstaje przy zwieraniu przerywacza. Obecność rezystora 29 zapewnia opadanie prądu złącza p-n 3 nie do zera, a do pewnej minimalnej wartości zgodnie z nierównością (2).

Wariant urządzenia, w którym czwórnik 30 (fig. 8) włączony na wejściu wzmacniacza operacyjnego 11 zawiera jako element nieliniowy diodę 31 działa w sposób następujący. Element komutacyjny 2 wykonany w postaci przerywacza periodycznie dołącza do diody 31 blok zadawania prądu 7, wykonany w postaci źródła napięcia piłokształtnego. Przy tym prąd płynący przez diodę 31 będzie się zmieniał prawie eksponencjalnie. Ten sam prąd wskutek działania wzmacniacza operacyjnego 11 będzie przepływał przez złącze p-n 3.

Napięcie wyjściowe wzmacniacza 11, praktycznie równe napięciu na złączu p-n 3, jest różniczkowane przez blok różniczkowania 4 i sygnał z wyjścia bloku różniczkowania 4 dochodzi do rejestratora 5.

Zaletą opisanego wariantu urządzenia jest ta okoliczność, że charakterystyka napięciowo-prądowa złącza p-n 3 jest sprawdzana w odniesieniu

do rzeczywistej wzorcowej charakterystyki napięciowo-prądowej diody 31.

W tych przypadkach, kiedy jest wymagane porównawcze sprawdzanie współczynnika m , to zna-

czy otrzymanie sygnału $\frac{m - m_e}{m_e} = \frac{\Delta m}{m_e}$, gdzie

m — współczynnik odchylenia charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego od idealnej, m_e — współczynnik odchylenia charakterystyki napięciowo-prądowej wzorcowej diody od idealnej, zaleca się warianty urządzenia przedstawione na fig. 9 i 10. Umożliwiają one odejmowanie od napięcia powstającego na złączu p-n napięcia bloku zadawania prądu 7, dzięki czemu zdolność rozdzielcza tych urządzeń może być znacznie wyższa niż urządzenia przedstawione na fig. 8.

Rzeczywiście, jeżeli charakterystyki napięciowo-prądowe diody 31 i złącza p-n 3 są identyczne, to na wyjściu wzmacniacza 11 nastąpi powtórzenie napięcia bloku zadawania prądu 7. Dlatego w idealnym przypadku przy odejmowaniu tych napięć na wyjściu bloku odejmowania wystąpi zerowe napięcie. Przy tym wzmacniacz sumacyjny 37 (fig. 9) jak i wzmacniacz różnicowy 44 (fig. 10) pełnią również rolę bloków odejmowania. Napięcia z ich wyjść mogą być doprowadzane bezpośrednio do rejestratora 5, a mogą być również różniczkowane w bloku różniczkowania.

Zastosowanie wzmacniacza sumacyjnego 37 (fig. 9) tłumaczy się odwrotnymi fazami napięć na wyjściu bloku zadawania prądu 7 i na wyjściu wzmacniacza operacyjnego 11. Niezależnie od tego, że w urządzeniach przedstawionych na fig. 9 i 10 wypadkową informację wyjściową o współczynni-

ku m otrzymuje się w postaci $\frac{m - m_e}{m_e}$, to dzie-

ki temu, że m_e jest zadane, wybór granic dopuszczalnych wartości m do prognozowania trwałości elementów półprzewodnikowych, zawierających co najmniej jedno złącze p-n, dokonywany jest zgodnie z nierównością $m_{\min} \leq m < m_{\max}$ gdzie $m_{\min} \leq 1$, a $m_{\max} \geq 2$, z której otrzymuje się graniczne wartości względnego odchylenia $\frac{m - m_e}{m_e} =$

$$\frac{m}{m_e}.$$

Wariant urządzenia z n generatorami prądu działa w następujący sposób:

Element komutacyjny 2 (fig. 11) wykonany w postaci wielopozycyjnego przełącznika działa w ten sposób, że po dołączeniu do wejścia wzmacniacza operacyjnego 11 przez rezystor 13 jednego z n rezystorów czwórnika 50 przez pewien czas periodycznie dołącza on do tego wejścia dwa rezystory o sąsiadujących wartościach oporności, dokonując tym samym nałożenia na składową stałą prądu złącza p-n 3 składowej zmiennej w postaci impulsów prostokątnych.

Przy tym zasada działania tego urządzenia dla każdej z n ustalonych wartości składowej stałej prądu złącza p-n 3 nie różni się od zasady działa-

nia urządzenia, w którym w celu dokonania pomiaru współczynnika m przez złącze p-n 3 (fig. 3) przepuszcza się prąd ze składową stałą i zmienną.

Równocześnie jest oczywiste, że przy takim doborze oporności n rezystorów, jaki umożliwia utrzymanie stałych przyrostów napięcia na złączu p-n, w rzeczywistości otrzymuje się eksponencjalną zależność dyskretnych wartości składowej stałej przepuszczanego przez złącze p-n 3 (fig. 11) prądu od położenia przełącznika wielopozycyjnego to znaczy od n . W ten sposób przy $n \rightarrow \infty$ będzie miał miejsce przypadek zadawania prądu płynącego przez złącze p-n w postaci impulsów eksponencjalnych, jak to odbywa się w urządzeniach przedstawionych na fig. 7 ÷ 10. Naturalnie, w tym wypadku przyrosty napięcia na złączu p-n będą dążyć do zera. Właśnie dlatego do otrzymania informacji o współczynniku m w urządzeniach przedstawionych na fig. 7 ÷ 10 w charakterze przetworznika napięcia stosowany jest blok różniczkowania.

Zaletą urządzeń przedstawionych na fig. 3—6 jest możliwość dokonywania pomiarów współczynnika odchylenia m w warunkach „statycznych” w każdym punkcie charakterystyki napięciowo-prądowej złącza p-n za pomocą woltomierza analogowego lub cyfrowego wykorzystywanego jako rejestrator 5. Zaletą urządzeń przedstawionych na fig. 7—10 jest możliwość obserwacji zależności współczynnika odchylenia m od prądu na ekranie oscylografu zastosowanego w charakterze rejestratora 5.

Urządzenie przedstawione na fig. 11 umożliwia zarówno wykonywanie pomiaru współczynnika odchylenia m w dowolnym punkcie charakterystyki napięciowo-prądowej z ustaleniem tego punktu w ciągu dowolnie długiego odcinka czasu, to znaczy w warunkach „statycznych”, jak i obserwację zależności tego współczynnika w postaci zbioru dyskretnych wartości dla n ustalonych wartości składowej stałej prądu płynącego przez złącze p-n 3.

Wykorzystanie w proponowanym sposobie kontroli jakości elementów półprzewodnikowych i układów scalonych znanego parametru m jako kryterium umożliwia dokonywanie wiarygodnej kontroli jakości zarówno w stadium produkcji elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, jak i w stadium ich kontroli końcowej. Wynalazek jest zwłaszcza przydatny przy produkcji aparatury na elementach półprzewodnikowych i układach scalonych przeznaczonej do długotrwałego użytkowania.

Sposób i urządzenie umożliwiają bezpośredni, szybki i dokładny pomiar współczynnika m , jak również obserwację zależności $m = f(I)$ w bardzo szerokim zakresie prądów przewodzenia złącza p-n.

Sposób i urządzenie według wynalazku pozwalają na 100% kontrolę elementów półprzewodnikowych i układów scalonych przy dużej szybkości działania w całym wspomnianym zakresie złącza p-n.

Cechami wyróżniającymi urządzenia są: prostota układu elektrycznego, małe gabaryty i możliwość obsłużenia urządzenia przez operatora bez specjalnego przygotowania. Celowe jest wykorzystanie

tego urządzenia również w warunkach laboratoriów naukowo-badawczych do analizy uszkodzeń elementów półprzewodnikowych i układów scalonych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierających przynajmniej jedno dostępne do podłączenia się do niego złącze p-n, polegający na tym, że przepuszcza się przez złącze w kierunku, zgodnym z kierunkiem przewodzenia, zmieniający się prąd i określa się odchylenie jego charakterystyki napięciowo-prądowej od charakterystyki wzorcowej oraz parametr, według którego sędzi się o jakości badanego zespołu, **znamienny tym**, że za wzorcową charakterystykę napięciowo-prądową przyjmuje się charakterystykę napięciowo-prądową idealnego złącza p-n, wyrażoną równaniem postaci $I = I_s$

$$U = \frac{\varphi T}{m} \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right)$$

z rzeczywistej charakterystyki napięciowo-prądowej od charakterystyki idealnego złącza p-n, w którym to równaniu

$$\varphi T = \frac{KT}{q}$$

gdzie:

K — stała Boltzmanna, T — temperatura absolutna, q — ładunek elektronu, U — napięcie na złączu p-n, I_s — prąd cieplny (prąd nasycenia przy polaryzacji odwrotnej złącza p-n), I — prąd przepływający przez złącze p-n, przy czym prąd I , przepływający zgodnie z kierunkiem przewodzenia, ogranicza się tak, aby spełnione były następujące warunki:

$$U \geq 4 \varphi T, I < \frac{T}{R_b}$$

gdzie R_b — rezystancja zastępcza, załączona szeregowo do złącza p-n, i według przyrostów napięcia na złączu p-n mierzy się współczynnik m , a odbiera się, jako dobre, takie przyrządy półprzewodnikowe i takie układy scalone, których charakterystyki napięciowo-prądowe charakteryzują się współczynnikami m spełniającymi następujące warunki:

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max}, \text{ gdzie } m_{\min} \leq 1, \text{ a } m_{\max} \geq 2.$$

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że kształt prądu przepuszczanego przez złącze p-n w kierunku przewodzenia dobiera się tak, aby zapewnić otrzymanie na złączu p-n o idealnej charakterystyce napięciowo-prądowej stałych przyrostów napięcia, których zmiana zawiera informację

o wartości współczynnika m , dla złącza p-n badanych przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych.

3. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że prąd przepuszczany przez złącze p-n ma kształt określony zawartością składowej stałej i składowej zmiennej, których stosunek utrzymuje się stały, a o wielkości współczynnika m wnioskuje się na podstawie wartości amplitudy składowej zmiennej napięcia na złączu p-n.

4. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że prąd przepuszczany przez złącze p-n ma kształt impulsów eksponencjalnych, przy czym impulsy napięcia powstające na złączu p-n są różniczkowane, a o wielkości współczynnika m wnioskuje się na podstawie chwilowych wartości amplitudy impulsów otrzymanych w wyniku różniczkowania.

5. Urządzenie do kontroli jakości przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych, zawierające generator prądowy, do którego przez element komutacyjny dołączone jest złącze p-n elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego oraz połączony z nim elektrycznie rejestrator, **znamiennie tym**, że wyposażone jest w co najmniej jeden dodatkowy generator prądowy (6), którego wejście sterujące dołączone jest do wejścia sterującego podstawowego generatora prądowego (1), dołączonego na przemian z generatorem podstawowym (1) do złącza p-n (3) za pośrednictwem elementu komutacyjnego (2), w blok zadawania prądu (7), którego wyjście dołączone jest do wejść sterujących tych generatorów (1), (6) i zgodnie z którego sygnałem zmieniają się synchronicznie prądy na wyjściach generatorów (1), (6), w dołączony równolegle do bloku zadawania prądu (7) miernik (8) wartości średniej prądu przepuszczanego przez złącze p-n (3), jak również w przetwornik napięcia (4) zdejmowanego ze złącza p-n (3) na sygnał elektryczny o współczynniku przetwarzania zależnym od kształtu przepuszczanego przez złącze p-n (3) prądu i jego średniej wielkości, który realizuje sprzężenie elektryczne między złączem p-n (3) przyrządu półprzewodnikowego lub układu scalonego a rejestratorem (5) zapisującym wielkość współczynnika m .

6. Urządzenie według zastrz. 5, **znamiennie tym**, że wyjście bloku zadawania prądu (7) połączone jest z jednym z wejść przetwornika napięcia (9).

7. Urządzenie według zastrz. 5, **znamiennie tym**, że przy przepuszczaniu przez złącze p-n (3) prądu, którego kształt jest określony zawartością składowej stałej i składowej zmiennej, prądowy generator podstawowy (1) i dodatkowy (6) zrealizowane są na wzmacniaczu operacyjnym (11), w którego gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego umieszczone jest złącze p-n (3) badanego przyrządu półprzewodnikowego lub układu scalonego oraz na dołączonym do jego wejścia czwórniku rezystancyjnym, który za pośrednictwem elementu komutacyjnego powoduje przepływ przez złącze (3) co najmniej dwóch zmieniających się synchronicznie prądów, przy czym blok zadawania prądu (7) wykonany jest w postaci generatora napięcia stałego, a przetwornik napięcia (4) wykonany jest w postaci wzmacniacza napięcia zmiennego o współczynniku wzmocnienia proporcjonalnym do różnicy prądów na wejściu wzmacniacza operacyjnego (11).

8. Urządzenie według zastrz. 5, **znamiennie tym**, że przy przepuszczaniu przez złącze p-n (3) prądu o kształcie impulsów eksponencjalnych prądowy generator podstawowy (1) i generator dodatkowy (6) wykonane są na wzmacniaczu operacyjnym (11) w którego gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego umieszczone jest złącze p-n (3) badanego przyrządu półprzewodnikowego lub obwodu scalonego i na dołączonym do jego wejścia czwórniku zrealizowanym na czynnych i biernych elementach opornościowych lub na elementach nieliniowych, który łącznie z blokiem zadawania prądu (7) i elementem komutacyjnym (2) powoduje przepływ przez złącze p-n (3) prądu mającego postać impulsów eksponencjalnych, przy czym przetwornik napięcia (4) i (9) wykonany jest w postaci bloku różniczkowania.

9. Urządzenie według zastrz. 6, **znamiennie tym**, że przetwornik napięcia (9) zawiera wzmacniacz (37, 44), mający dwa wejścia, z których to wejście pierwsze jest podłączone do badanego złącza p-n (3), a drugie — z wyjściem bloku zadawania prądu (7).

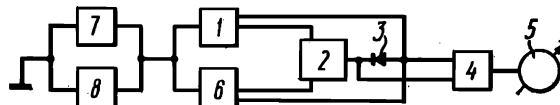


FIG. 1

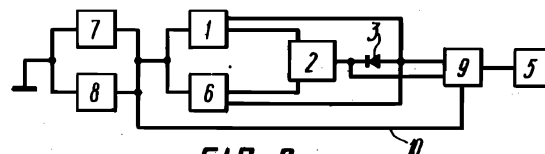


FIG. 2

