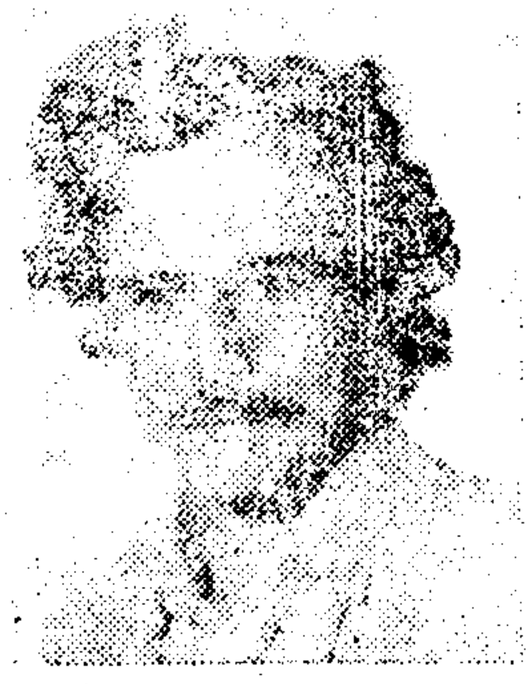
# Układy scalone $I^2L$



Mgr inż.
DARIUSZ LEWANDOWSKI

doc. dr hab.
BOGDAN WILAMOWSKI

Instytut Technologii Elektronicznej
Politechniki Gdańskiej

Zaproponowana w 1972 roku przez H. H. Bergera, S. K. Wiedmana [1] oraz niezależnie przez K. Harta i A. Sloba [2] nowa koncepcja układów scalonych zwanych $I^2L$, stała się dużym krokiem w rozwoju bipolarnych układów scalonych wielkiej skali integracji. Prostota wykonania, duża gęstość upakowania, duża szybkość działania, bardzo mały pobór mocy — to zalety, które skłoniły projektantów przyrządów półprzewodnikowych do intensywnych prac nad układami cyfrowymi typu $I^2L$. Stały się one rozwiązaniem konkurencyjnym w stosunku do układów typu MOS. Sprzedawane obecnie przez czołowe firmy światowe układy $I^2L$ charakteryzują się parametrami przedstawionymi w tabeli. Podano tam również dla porównania parametry układów ECL (wykonanych również za pomocą technologii bipolarnej) oraz układów CMOS SOS i NMOS (wykonanych w technologii MOS).

Parametry cyfrowych układów scalonych LSI [3]

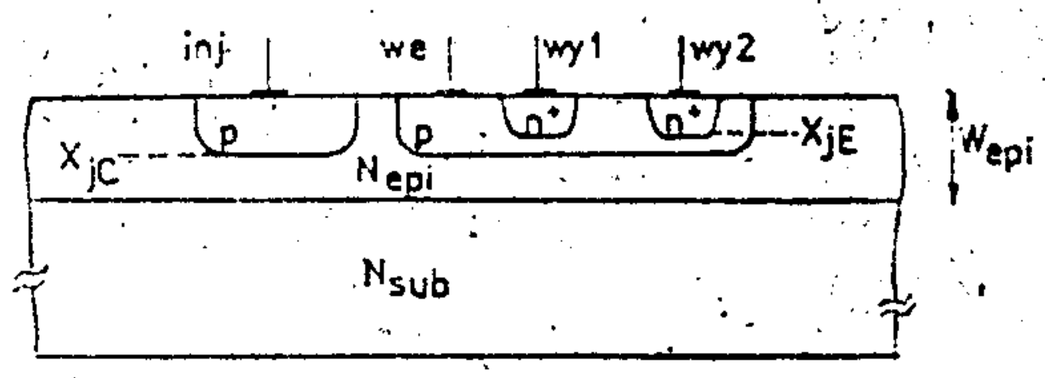
| Parametry | Stosowana technologia (1979—1980) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | bipolarna | | MOS | |
| | $I^2L$ | ECL | CMOS SOS | NMOS |
| Liczba procesów technologicznych | 13—17 | 19—23 | 14—20 | 9—15 |
| Gęstość upakowania [liczba bramek/mm²] | 75—150 | 15—20 | 100—200 | 100—200 |
| Czas propagacji $\tau_d$ [ns] | 7—50 | 97—2 | 4—20 | 4—25 |
| Iloczyn $\tau_d \cdot P$[pJ] | 0,2—2 | 15—80 | 0,5—30 | 5—50 |

W opracowaniach laboratoryjnych układów $I^2L$ uzyskano rozwiązania o minimalnym czasie propagacji $\tau_d = 2{,}5$ ns w wyniku zastosowania poly-Si w sposób podobny do izolacji tlenkowej. Ponadto w przypadku zastosowania tranzystora polowego (zamiast bipolarnego $n$-$p$-$n$) jako tranzystora kluczowanego uzyskano bardzo mały minimalny iloczyn $\tau_d \times P = 70$ fJ (tzn. $\tau_d = 70$ ns przy mocy rozpraszanej w bramce $P = 1$ μW!).

Kluczowym problemem w konstrukcji bramki $I^2L$ jest wykonanie tranzystorów o odpowiednich parametrach inwersyjnych, tzn. o dużym zwarciowym współczynniku wzmocnienia prądowego $\beta_i$ oraz dużej częstotliwości granicznej $\omega_T$. Zapewnienie dużej wartości $\beta_i$ tranzystorów kluczowanych jest wymagane ze względu na konieczność uzyskania odpowiednio dużej obciążalności układów. Przy małym współczynniku $\beta_i$ rozrzut technologiczny powoduje znaczne zmniejszenie uzysku produkcyjnego. Otrzymanie dużej wartości $\beta_i$ możliwe jest przez realizację odpowiedniego rozkładu domieszek w tranzystorze. W poniższej pracy zaproponowano wykorzystanie zjawiska dyfuzji bocznej do kształtowania bazy o małej szerokości i niewielkiej koncentracji domieszek. Zasadniczym celem pracy było sprawdzenie możliwości realizacji koncepcji.

## Wpływ konstrukcji na parametry komórki $I^2L$

W celu wykonania bramki $I^2L$ (rys. 1) o dobrych właściwościach należy określić, które z parametrów konstrukcyjnych mają zasadniczy wpływ na parametry elektryczne układu. Istnieje wiele mniej lub




Rys. 1. Podstawowa komórka $I^2L$

bardziej skomplikowanych rozwiązań układu równań transportu nośników komórki $I^2L$. Zadowalającą zgodność z eksperymentem daje znany [4] wzór na zasadniczy parametr — inwersyjny współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta_i$ tranzystora $n$-$p$-$n$

$$\beta_i \cong \left(\frac{A_C}{A_B}\right) \frac{\left[\int_{X_{jE}}^{X_{jC}} N_B(x)\,dx\right]^{-1}}{\left[\left(1-\frac{A_C}{A_B}\right)n+1\right]\left[\int_{0}^{X_{jC}} N_B(x)\,dx\right]^{-1} + \frac{(n+1)\,S_{nn^+}}{D_n N_{epi}}} \tag{1}$$

gdzie:

$A_C$, $A_B$ — powierzchnie pojedynczego kolektora i bazy,

$n$ — liczba kolektorów,

$S_{nn^+}$ — szybkość rekombinacji dziur w złączu $n$-$n^+$,

$N_{epi}$ — koncentracja domieszek w warstwie epitaksjalnej,

$D_n$ — stała dyfuzji elektronów,

$N_B(x)$ — rozkład koncentracji domieszek w bazie.

Zgodnie z zależnością (1), w celu otrzymania odpowiednio dużej wartości współczynnika $\beta_i$ należy spełnić warunki

— $\int_{X_{jE}}^{X_{jC}} N_B(x)\,dx$ oraz $\int_{0}^{X_{jC}} N_B(x)\,dx$ muszą mieć małą wartość.

— $N_{epi}$ i $S_{nn}^+$ powinny być duże.

Spełnienie powyższych warunków pociąga za sobą różne konsekwencje. Nie można zbytnio zmniejszać koncentracji domieszek w bazie ze względu na wpływ rezystancji rozproszonej bazy na właściwości częstotliwościowe tranzystora i zjawisko nierównomierności rozpływu prądu. Zmniejszanie całki z rozkładu domieszek w bazie pod kolektorem poniżej wartości $2 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2}$ jest trudne technologicznie (zwłaszcza kontrolowanie małej szerokości bazy) szczególnie przy kolektorach wykonanych za pomocą standardowej dyfuzji fosforu. Zwiększanie koncentracji domieszek w warstwie epitaksjalnej $N_{epi}$ prowadzi do wzrostu pojemności złączowych, a więc do znacznego zwiększenia iloczynu $r_d$ x$P$. Szybkość rekombinacji dziur $S_{nn}^+$ przy małym poziomie wstrzykiwania określona jest znaną [5] zależnością

$$S_{nn^+} = \frac{W_{nn^+} \cdot U_T}{\tau_{nn^+} \cdot U_{nn^+}} + \frac{D_{psub} \cdot N_{epi}}{L_{psub} \cdot N_{sub}} \qquad (2)$$

gdzie:

$W_{nn^+}$ — grubość warstwy przejściowej złącza $n$-$n^+$,

$\tau_{nn^+}$ — czas życia elektronów w złączu $n$-$n^+$,

$U_{nn^+}$ — spadek napięcia na złączu $n$-$n^+$,

$U_T$ — potencjał termiczny,

$L_{psub}$ — długość dyfuzji w podłożu,

$D_{psub}$ — stała dyfuzji w podłożu,

$N_{sub}$ — koncentracja domieszek w podłożu.

Z zależności (2) widać, że aby szybkość rekombinacji $S_{nn^+}$ była odpowiednio mała, należy tak prowadzić procesy technologiczne, aby uzyskać duże czasy życia. Drugą jeszcze bardziej istotną sprawą jest konieczność stosowania płytek półprzewodnikowych o możliwie dużej koncentracji domieszek w podłożu $N_{sub}$. Należy stosować płytki domieszkowane arsenem o koncentracji $N_{sub} \geqslant 10^{19}$ cm$^3$.

Najistotniejszym, z punktu widzenia zastosowań, parametrem statycznym bramki I$^2$L jest obciążalność $\gamma$. Jest ona zdefiniowana jako stosunek prądu wyjściowego bramki w stanie niskim na wyjściu do prądu wejściowego w stanie wysokim na wyjściu

$$\gamma = I_{Wy0}/I_{We1} \qquad (3)$$

Parametr ten w przybliżeniu równy jest tzw. wzmocnieniu efektywnemu bramki $\beta_u$ mierzonemu w układzie z rys. 2. Istnieje [4] następująca zależność między parametrami $\beta_u$ oraz $\beta_i$

$$\beta_u = \frac{I_{no}}{I_{no}/(\beta_i + I_{po})} \qquad (4)$$

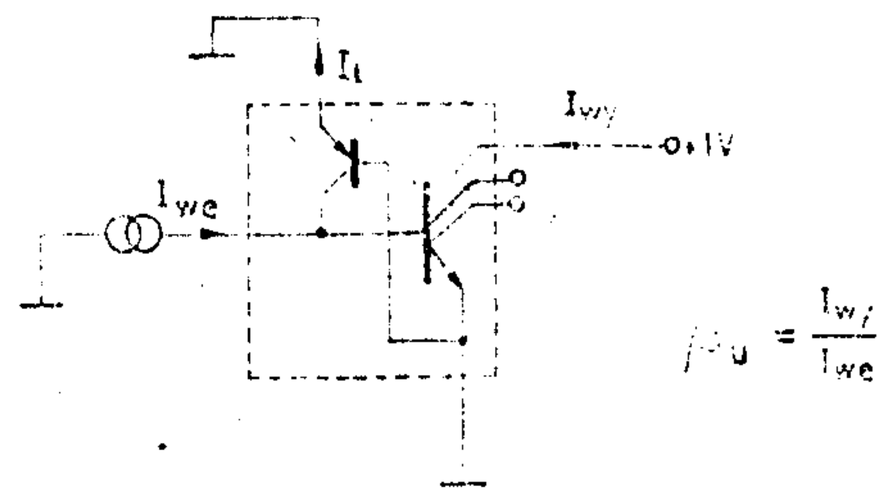
gdzie prąd wstrzykiwany do bazy aktywnej $I_{no}$ (dla tranzystorów $n$-$p$-$n$) zdefiniowany jest przez równanie

$$I_{Wy} = I_{no} \exp(U_{We}/U_T) \qquad (4a)$$

natomiast prąd wstrzykiwany do bazy injektora $I_{po}$ (dla tranzystorów $p$-$n$-$p$) jest określony przez równanie

$$I_{po} = I_{po} \exp(U_{We}/U_T) \qquad (4b)$$

Współczynnik $I_{no}$ określony jest przez „liczbę Gummela" w bazie aktywnej, a $I_{po}$ przez „liczbę Gummela" w bazie injektora. Na podstawie zależności (4) widać, że w celu uzyskania wysokiej obciążalności należy uzyskać duży iloraz $I_{no}/I_{po}$.




Rys. 2. Układ do pomiaru współczynnika $\beta_u$

Opisany powyżej model obciążalności nie uwzględnia zjawiska rekombinacji powierzchniowej i wpływu geometrii struktury.

Obok obciążalności, drugim istotnym parametrem bramki jest jej czas propagacji. Określony on jest głównie przez inwersyjną częstotliwość graniczną tranzystora $n$-$p$-$n$. Opisuje ją zależność [4]

$$\omega_{ri} = \left(\frac{A_C}{A_B}\right) \frac{D_n \cdot N_{epi}}{(n+1)\, W_{epi} \int_{X_{jE}}^{X_{jC}} N_B(x)\,dx} \qquad (5)$$

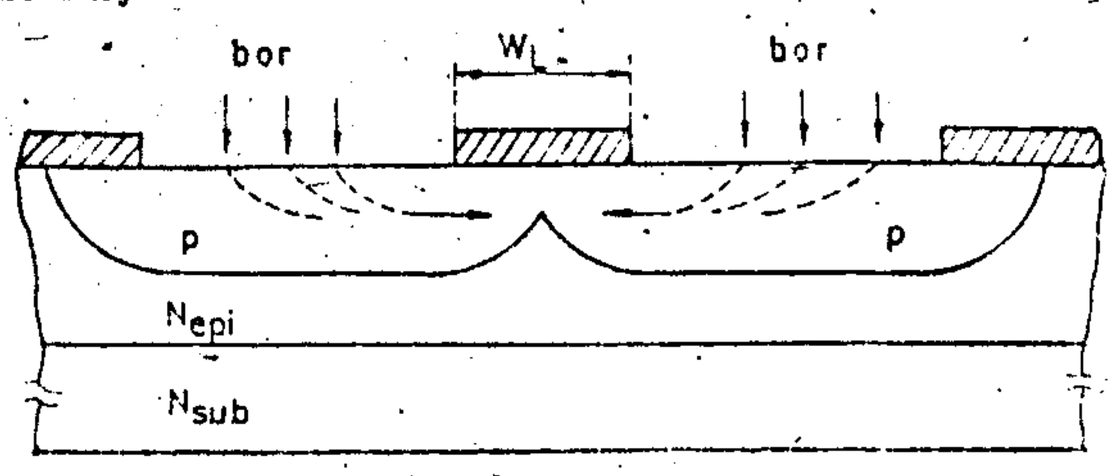
gdzie $W_{epi}$ — grubość warstwy epitaksjalnej.

Z zależności tej wynika, że poza omówionymi wcześniej parametrami konstrukcyjnymi należy stosować możliwie cienkie warstwy epitaksjalne.

**Opis wykonanej struktury**

Jedną z bardziej obiecujących możliwości spełniania wyżej opisanych warunków i wykonania tranzystorów $n$-$p$-$n$ o odpowiednio dużych inwersyjnych współczynnikach wzmocnienia i dobrych parametrach częstotliwościowych jest wykorzystanie dyfuzji bocznej. Zasadę kształtowania cienkiej i słabo domieszkowanej bazy aktywnej w oparciu o dyfuzję boczną przedstawia rys. 3. Okno do dyfuzji boru (baza) jest zasłonięte paskiem tlenku krzemu $SiO_2$ o szerokości 4 μm $< W_L <$ 8 μm. W trakcie procesu redyfuzji następuje w wyniku dyfuzji bocznej „podchodzenie" domieszki pod pasek tlenku krzemu. Zostaje w ten sposób ukształtowana baza aktywna. Następnie nad bazą aktywną wykonuje się kolektor. W dalszej kolejności następuje metalizacja. Cały

Rys. 3. Kształtowanie bazy aktywnej za pomocą dyfuzji bocznej



proces technologiczny wymaga czterech masek i trzech procesów termicznych (epitaksja, dyfuzja boru, dyfuzja fosforu). W celu polepszenia parametrów częstotliwościowych (zmniejszenie współczynników wzmocnienia pasożytniczych tranzystorów *p-n-p* pomiędzy bazami sąsiednich bramek) można wykonywać przed bazą głęboki pierścień $n^+$, komplikując częściowo proces technologiczny.

### Otrzymane rezultaty

W celu sprawdzenia realizowalności powyższej koncepcji wykonano pojedyncze inwertery $I^2L$ oraz oscylatory pierścieniowe składające się z dziewięciu bramek i buforu.

Zmierzone parametry uzyskanych struktur wynosiły:

— inwersyjny współczynnik wzmocnienia tranzystorów $\beta_{it_{typ}} = 7$,

— obciążalność $1 < \gamma < 6$,

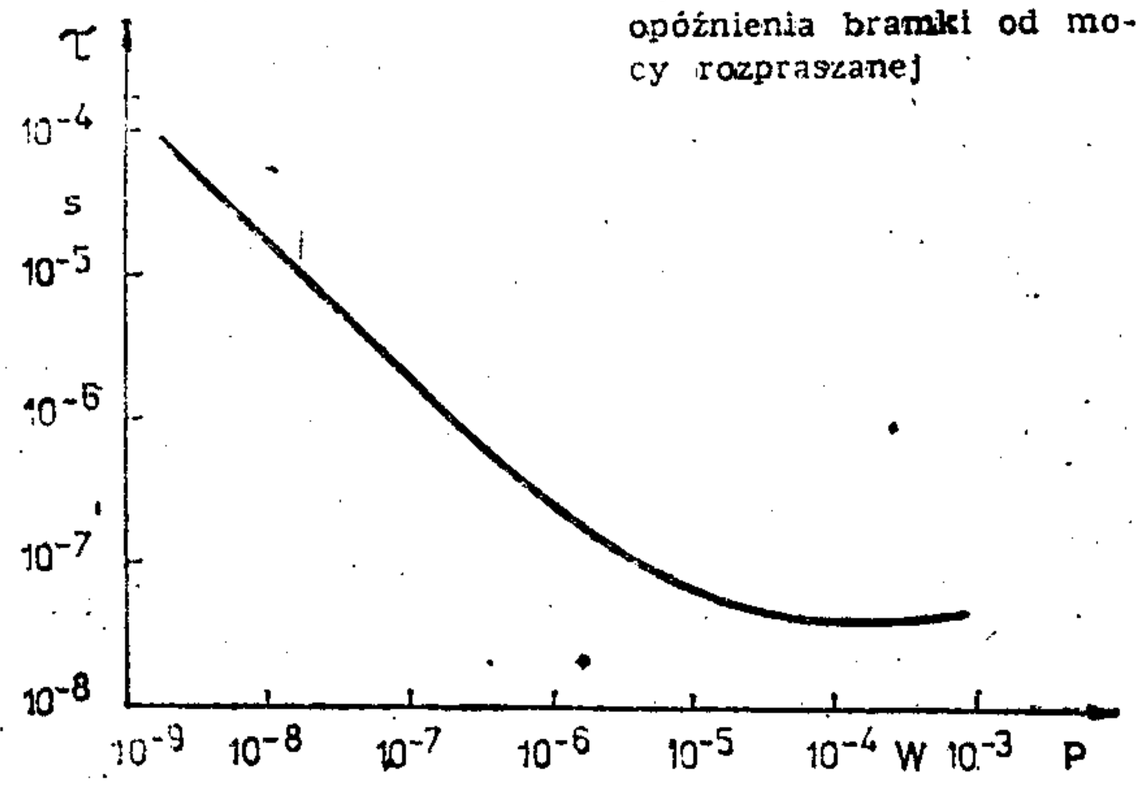
— minimalny czas propagacji bramki (mierzony w oscylatorze pierścieniowym) $\tau_{d\,min} = 25 \div 50$ ns przy rozpraszanej w bramce mocy $P = 20 \div 70$ µW ($\tau_d \cdot P = 1 \div 1{,}4$ pJ),

— minimalny iloczyn opóźnienia i mocy $\tau_d \cdot P < 0{,}15$ pJ przy czasach propagacji $\tau \geqslant 1$ µs ($P < 50$ nW).

Zależność czasu propagacji od mocy traconej w bramce przedstawiono na rys. 4.

### Wnioski

Uzyskiwane rozkłady domieszek są podobne do otrzymywanych za pomocą implantacji jonów, powszechnie stosowanej przy wytwarzaniu układów $I^2L$. Jednak koncepcja wykorzystywania dyfuzji bocznej nie wymaga użycia skomplikowanej aparatury (implantatorów) i jest możliwa przy wykorzystaniu oprzyrządowania technologicznego przeznaczonego do produkcji standardowych tranzystorów indywidualnych. Niewątpliwie zaletą opisanych układów jest obok prostoty wykonania, bardzo duża gęstość upakowania. Wynosi ona przy zastosowaniu minimalnego wymiaru okien kontaktów 5 µm około 200 bramek/mm².




Rys. 4. Zależność czasu opóźnienia bramki od mocy rozpraszanej


LITERATURA

1. *Berger H. H., Wiedman S. K.*: ISSCC Digest of Technical Papers, Feb. 1972, pp. 90—91.
2. *Hart K., Slob A.*: ISSCC Digest of Technical Papers, Feb. 1972, pp. 92—93.
3. Electronics, April 17, 1980, p. 547.
4. *Klaasen F. M.*: IEEE Trans. on Electron Dev., March 1975, pp. 145—152.
5. *Dutton R. W., Whittier R. J.*: IEEE Trans. on Electron Dev., May 1979, pp. 458—467.



Inż. TADEUSZ ŚWIERCZYŃSKI
dr inż. EWA JAKUBCZYK
doc. dr BOGDAN CAŁUSIŃSKI
mgr JADWIGA OLESIK
dr BOŻENA TOPOLNICKA
KRZYSZTOF TOPOLA
mgr ANDRZEJ KRYZA

Zakład Fizyki Ogólnej
Wyższa Szkoła Pedagogiczna Częstochowa


# Złącze p-n jako emiter elektronów wtórnych

W 1936 r. Malter [1, 2] zauważył znaczny wzrost współczynnika emisji wtórnej (o kilka rzędów wielkości) podczas bombardowania elektronami próbki aluminiowej.

Po dokładniejszych badaniach tego zjawiska okazało się, że jego przyczyna tkwi w ładowaniu się zewnętrznej powierzchni warstwy tlenku aluminium (graniczącej z próżnią) pokrywającej płytkę. Przy pewnych, dostatecznie dużych energiach elektronów w wiązce pierwotnej obserwuje się wzrost współczynnika emisji wtórnej. Natomiast przy mniejszych wartościach energii — jego spadek. Zjawisko to jest związane z tunelowaniem elektronów pochodzących z podłoża aluminiowego poprzez warstwę tlenku, w wyniku zimnej emisji wywołanej polem elektrycznym o wystarczająco dużym natężeniu [3].

Wystąpieniu zimnej emisji sprzyja naładowanie zewnętrznej powierzchni tlenku ładunkiem dodatnim. Może to nastąpić nawet samorzutnie wtedy, gdy początkowa wartość współczynnika emisji wtórnej z tlenku aluminium będzie większa od 1.

Przy niewielkiej grubości warstwy tlenku (rzędu 0,1 µm) do wytworzenia nad powierzchnią podłoża metalowego pola elektrycznego o wystarczająco dużym natężeniu (rzędu $10^6$ V/cm) wystarczy niewielka różnica potencjałów (rzędu 1 V) między zewnętrzną powierzchnią warstwy tlenku a podłożem.

W późniejszym okresie wielu autorów [4, 5, 6] badało te zjawiska, wytwarzając nad powierzchnią próbek odpowiednio skierowane pole elektryczne, którego wartość można było kontrolować w przybliżeniu w czasie badań lub też na podstawie emisji wtórnej podczas „przestrzeliwania" elektronami cienkich warstw badanych substancji umieszczonych w polu elektrycznym o odpowiednim kierunku i znanym natężeniu. Nie udało się jednak uzyskać takich warunków, aby zjawisko emisji wtórnej przebiegało stabilnie. Jednym złączem spełniającym te warunki i możliwym do uzyskania w kraju mogło być złącze fotoogniwa krzemowego.

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie badań wstępnych nad możliwością zwiększenia współczynnika emisji wtórnej przy użyciu jako emitera złącza *p-n* położonego dostatecznie płytko pod powierzchnią próbki i spolaryzowaniu go w ten sposób, aby pole elektryczne w złączu sprzyjało „emisji" elektronów z próbki.

### Próbka, aparatura i przebieg badań

Do badań użyto ogniwo fotoelektryczne, które było wykonane z monokrystalicznej płytki krzemowej o orientacji (111), rezystywności właściwej ok. $8 \cdot 10^{-2}$ m i typie przewodnictwa *p*. Materiałem wyjściowym do wykonania płytki był krzem typu *p* domieszkowany borem. Warstwę *n* na powierzchni płytki wytworzono metodą wdyfundowania fosforu (z par $P_2O_5$), uzyskując w ten sposób płytko pod powierzchnią położone złącze *p-n*.

Złącze to wykonano w Instytucie Techniki Elektronowej. Przy użyciu takiego złącza i spolaryzowa-