

J. SARNECKI

INSTYTUT TECHNOLOGII MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH

ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

A. SIENNICKI, M. NOWICKI, Z. NIECHODA

INSTYTUT MIKROELEKTRONIKI I OPTOELEKTRONIKI PW

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

## **Wpływ getterowania laserowego na czas życia nośników mniejszościowych w krzemowej warstwie epitaksjalnej**

### **1. WSTĘP**

Zastosowanie epitaksjalnych warstw krzemu w technologii CMOS spowodowało wzrost zainteresowania metodami getterowania silnie domieszkowanych krzemowych płytek  $n^+$  i  $p^+$  stosowanych jako podłoża do epitaksji krzemu.

Dla poprawy perfekcji strukturalnej krzemowych warstw epitaksjalnych, podobnie jak dla litych płytek krzemowych używanych w technologii układów scalonych MOS i bipolarnych, stosuje się getterowanie wewnętrzne [1] oraz różne metody getterowania zewnętrznego [2, 3, 4]. Dla typowych metod getterowania zewnętrznego, takich jak: osadzanie na tylnej stronie płytki podłożowej cienkich warstw  $Si_3N_4$  czy polikrystalicznego krzemu, implantacja jonów i dyfuzja fosforu, wytworzone obszary naprężeń działają jako wydajne miejsca pułapowania zanieczyszczeń metalicznych.

Istotnym ograniczeniem tych metod zewnętrznego getterowania jest zmniejszanie się własności getterujących z kolejnymi wysokotemperaturowymi procesami. Niedogodności tej można uniknąć stosując mikroobróbkę laserową do getterowania zewnętrznego płytek krzemowych (Laser Backside Damage Gettering) [5]. Najczęściej wykorzystuje się w procesie laserowego getterowania laser Nd:YAG o przestrajalnej dobroci [6, 7, 8, 9, 10]. Spotyka się również informacje o próbach stosowania lasera aleksandrytowego [11], argonowego o pracy ciągłej [11] i ekscymerowego [12].

Laserowe getterowanie nie znalazło dotychczas zastosowania w technologii krzemowych warstw epitaksjalnych.

Celem naszych badań jest określenie wpływu mikroobróbki laserowej impulsami lasera Nd:YAG płytek podłożowych na czasy życia nośników mniejszościowych w warstwie dla wybranego typu płytek z warstwą epitaksjalną stosowanych w produkcji przyrządów dyskretnych.



## 2. MIKROBRÓBKA LASEROWA

Mechanizm laserowego getterowania związany jest z polami naprężeń i defektami, jakie wywołują w obszarze tylnej strony płytki krzemowej działające na nią impulsy laserowe. W czasie kolejnych wysokotemperaturowych procesów naprężenia uwalniane są poprzez generację stabilnych temperaturowo dyslokacji, które działają jako pułapki defektów punktowych i zanieczyszczeń metalicznych. Mechanizm ten jest w zasadzie taki sam jak w innych metodach getterowania zewnętrznego.

W procesie mikroobróbki laserowej (laserowego getterowania) impuls laserowy powoduje silną lokalną erozję powierzchni płytki krzemowej. W miejscach oddziaływania z powierzchnią płytki zogniskowanej wiązki laserowej powstają zagłębienia (kratery).

Getterowanie laserowe płytek krzemowych przeprowadzono na mikroprocesorowo sterowanym stanowisku do mikroobróbki laserowej opracowanym i wykonanym w IMiO PW [13]. Stanowisko to wyposażone jest w laser Nd:YAG z przełącznikiem akustooptycznym. Częstotliwość impulsów TEM<sub>00</sub> o czasie trwania 200 ns można regulować w zakresie  $0,2 \pm 20$  kHz. Płytki naświetlane były impulsami laserowymi ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ) o gęstości energii około  $30 \text{ Jcm}^{-2}$ . Integralną częścią stanowiska do mikroobróbki laserowej jest stolik X-Y umożliwiający precyzyjny przesuw naświetlanej płytki w zakresie  $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  ze skokiem  $10 \mu\text{m}$ .

Proces mikroobróbki laserowej płytek polegał na lokalnym wielopunktowym oddziaływaniu zogniskowanego promieniowania laserowego na spodnią powierzchnię płytki podłożowej. Powstałe w wyniku tego procesu kratery o głębokości  $4 \pm 5 \mu\text{m}$  tworzą układ równoległych ścieżek. Mikroskopowe zdjęcie tylnej strony płytki podłożowej n<sup>+</sup> z układem kraterów powstałych w wyniku oddziaływania impulsów lasera Nd:YAG przedstawia rys. 1.

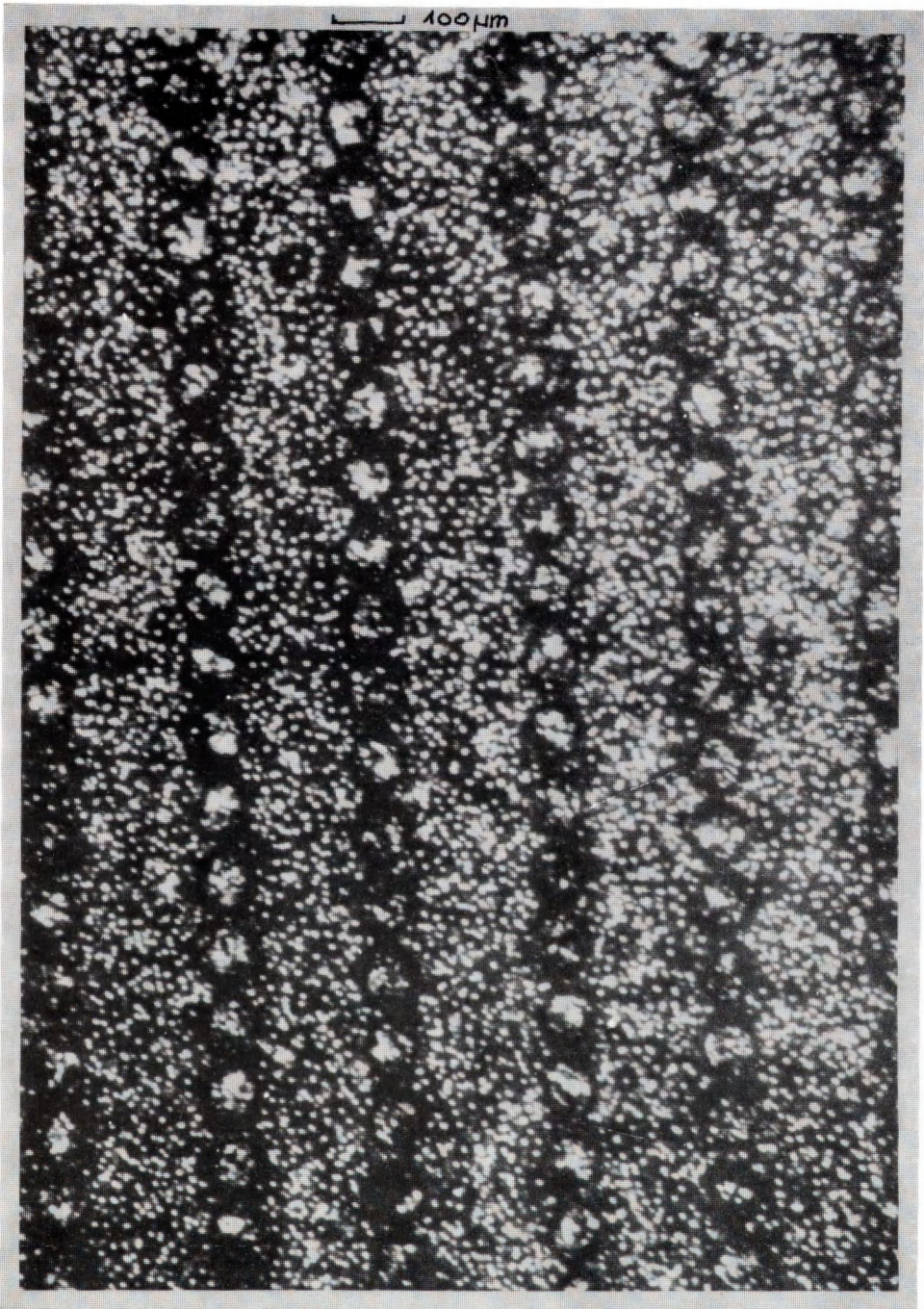
## 3. MATERIAŁ BADAWCZY

Przedmiotem badań były struktury n/n<sup>+</sup> o orientacji  $\langle 111 \rangle$  na płytkach podłożowych o średnicy 51 mm i grubości  $230 \pm 15 \mu\text{m}$ . Rezystywność płytek podłożowych mieściła się w zakresie  $0,008 \pm 0,018 \Omega \cdot \text{cm}$ . Są to typowe płytki podłożowe z krzemu monokrystalicznego otrzymanego metodą Czochralskiego domieszkowane Sb, przeznaczone do epitaksji krzemu i stosuje się je w produkcji przyrządów dyskretnych.

Zestawienie parametrów płytek krzemowych z warstwą epitaksjalną wraz z ich przeznaczeniem i charakterystyką procesu obróbki laserowej przedstawia tabela 1.

Procesy epitaksji przeprowadzono na urządzeniu do epitaksji Gemini 1 z obrotowym grzejnikiem w kształcie talerza. Stosowano grzejniki grafitowe z profilowanymi "kieszeniami" zapobiegające powstawaniu poślizgów. Źródłem krzemu był czterochlorek krzemu a domieszki typu n - fosforowódor. Grzejnik grafitowy przed procesem epitaksji był pokrywany warstwą niedomieszkowanego krzemu o grubości ok.  $5 \mu\text{m}$ . Etapem poprzedzającym wzrost warstw było oczyszczanie powierzchni płytek przez trawienie gazowym HCl w temperaturze  $1180^\circ\text{C}$ . W czasie tej operacji na tylną stronę płytek podłożowych nastąpiło przeniesienie krzemu uprzednio pokrywającego grzejnik grafitowy. Maskowanie tylnej powierzchni podłoża warstwą polikrystalicznego, niedomieszkowanego krzemu





Rys. 1. Układ kraterów na tylnej powierzchni płytki podłożowej





ogranicza efekt samodomieszkowania warstwy przez domieszkę z podłoża. Warstwy osadzone były z prędkością 0,9  $\mu\text{m}/\text{min}$  w temperaturze 1150°C.

Tabela 1

Parametry warstw epitaksjalnych i procesów obróbki laserowej

Grupa	h [ $\mu\text{m}$ ]	$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$\phi$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta_x$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	E [ $\text{Jcm}^{-2}$ ]
IA	16-20	2-2,5	80	100	240	30
IB	16-20	2-2,5	60	100	150	30
Diody impulsowe typu BAYP						
II	13-15	3,2-4,2	60	100	150	30
Tranzystory typu BFCP						
h - grubość warstwy epitaksjalnej, $\rho$ - rezystywność warstwy epitaksjalnej, $\phi$ - średnica kraterów, $\Delta_x$ - odległość kraterów w ścieżce, $\Delta_y$ - odległość między ścieżkami, E - gęstość energii impulsu laserowego						

Mikroobrobka laserowa płytek z grupy I przeprowadzona została przed osadzeniem warstwy epitaksjalnej, a dla grupy II po procesie epitaksji. W pierwszym przypadku działaniu impulsów laserowych poddana została tylna strona podłoża (powierzchnia trawiona chemicznie), zaś w drugim tylna powierzchnia struktury n/n<sup>+</sup> pokryta warstwą polikrystalicznego krzemu.

Płytki podłożowe po obróbce laserowej ulegały deformacji. Płytki wklęsłe od strony czynnej miały tendencję do wyprostowywania, natomiast wypukłe do powiększania wygięcia. Po procesie epitaksji wygięcie płytek wracało do wartości (< 25  $\mu\text{m}$ ) dopuszczalnych dla tego typu płytek z warstwą epitaksjalną. Wygięcie płytek mierzone było na bezkontaktowym mierniku pojemnościowym Microsense Model 6034.

Pomiary wygięcia przeprowadzono dla płytek grupy I. Generalnie większe deformacje cechowały płytki z grupy IA (większa gęstość kraterów). Maksymalne zmierzone wygięcie wynosiło + 44  $\mu\text{m}$  (po obróbce laserowej). Po procesie epitaksji wartość wygięcia zmniejszyła się do + 10  $\mu\text{m}$ .

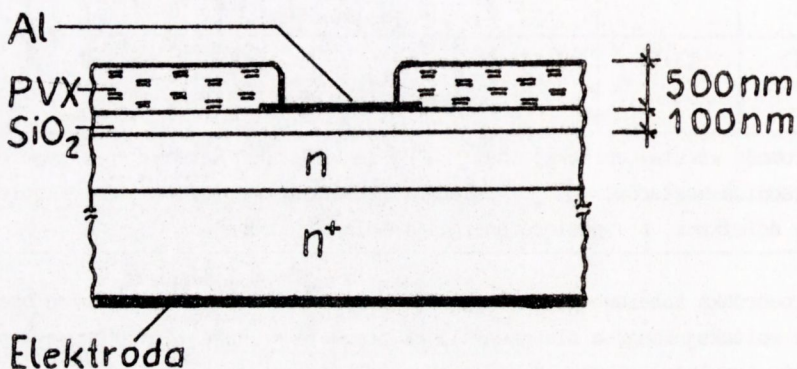
#### 4. POMIARY CZASÓW ŻYCIA NOŚNIKÓW MNIEJSZOŚCIOWYCH

Czas życia nośników należy do podstawowych parametrów charakteryzujących materiał półprzewodnikowy. Wartość czasu życia nośników mniejszościowych wynika wprost z własności elektrofizycznych materiału (koncentracji domieszek, koncentracji zanieczyszczeń, defektów sieci krystalicznej) i jako taka może charakteryzować stopień wewnętrznego zdefektowania materiału i jego czystość.

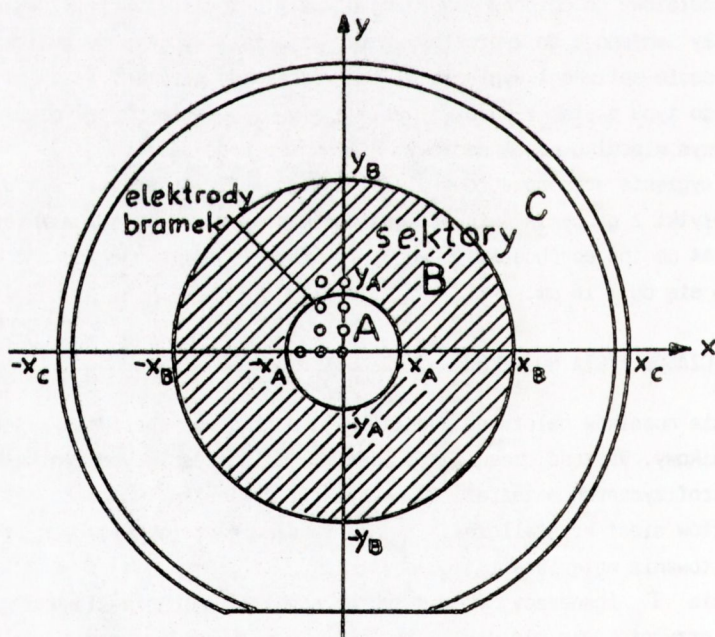
Czas życia  $\tau_g$  (generacyjny czas życia) nośników mniejszościowych w warstwie epitaksjalnej przyjęto jako miernik skuteczności procesu getterowania. Pomiar czasów życia w materiale półprzewodnikowym (warstwa epitaksjalna) przeprowadzono przy użyciu struktur (kondensatorów) MOS.

Kondensatory MOS wykonano na linii technologicznej struktur MOS w ITE. Zastosowano standardowy proces "MOS10" z modyfikacją wprowadzoną specjalnie na użytek niniejszych badań. Modyfikacja ta miała na celu ochronę powierzchni płytki dodatkową warstwą szkliva fosforowego PVX, która ograniczała szkodliwe wpływy atmosfery na charakterystyki relaksacyjne kondensatora MOS. Przekrój kondensatora MOS przedstawiono na rys. 2.

Każda z płytek zawierała około 600 kondensatorów o średnicy bramki równej 0,1 cm. Z pomiarów wykluczono struktury leżące bezpośrednio na obrzeżach płytki. Przy określaniu położenia danego kondensatora płytkę podzielono umownie na trzy sektory: A, B, C zgodnie z rys. 3.



Rys. 2. Przekrój kondensatora MOS



Rys. 3. Płytkę z kondensatorami MOS (przedstawiono kilka struktur)



W sektorze A znajduje się 20 kondensatorów, w sektorze B - około 150, zaś w sektorze C - około 350.

Płytki z kondensatorami MOS przed pomiarami zostały wygrzane w suchym azocie w temperaturze 450°C przez 30 minut.

Pomiary  $\tau_g$  przeprowadzono za pomocą półautomatycznego systemu pomiarowego wyposażonego w miernik admitancji nieliniowych FTG 511 wraz ze sterowanym źródłem napięcia oraz mikrokomputer realizujący programy pomiarowe i procedury obliczeniowe. Badaną strukturę umieszcza się na stoliku z mikromanipulatorami znajdującym się w światłoszczelnej komorze pomiarowej z ochronną atmosferą suchego azotu. Mierzona płytka jest próżniowo podtrzymywana w celu zapewnienia kontaktu elektrycznego. Kontakty górne otrzymuje się przez opuszczane ostrza z podglądem mikroskopowym.

System ten umożliwia pomiar czasów życia w półprzewodniku kondensatora MOS w zakresie od 10 ns do 50 ms.

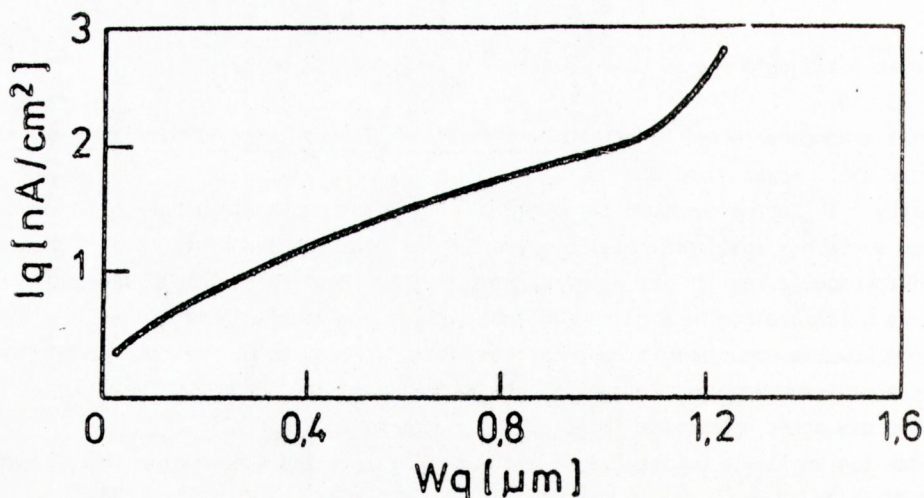
Dokładność pomiarów czasów życia wynika z możliwości stosowanej aparatury oraz procedury pomiarowej. Można ocenić, że wynikająca stąd niedokładność w określaniu czasów życia mieści się w zakresie  $\pm 15\%$ . Pomiar czasów życia w materiale półprzewodnikowym (warstwie epitaksjalnej) odbywa się dla kondensatora MOS w warunkach nierównowagi, gdy struktura MOS znajduje się w stanie przejścia od głębokiego zubożenia do inwersji. Prędkość tego przejścia zależy od mechanizmów odpowiedzialnych za generację objętościową nośników mniejszościowych w obszarze zubożonym.

Generacyjny czas życia nośników mniejszościowych wyliczono posługując się procedurą obliczeniową wykorzystującą metodę Zerbsta [14] z modyfikacjami wprowadzonymi w pracy [15] (metoda kompleksowa) z charakterystyk C-t kondensatora MOS.

Objętościowy czas życia nośników mniejszościowych określony jest z nachylenia krzywej Zerbsta przedstawiającej prędkość zmiany ładunku w warstwie inwersyjnej (prąd generacyjny  $J_g$ ) w funkcji głębokości obszaru zubożonego. Dla stałej wartości  $\tau_g$  w obszarze zubożonym i pomijalnej generacji powierzchniowej wykres  $J_g$  w funkcji  $w_g$ , gdzie  $w_g$  jest głębokością obszaru zubożonego, jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych.

W rzeczywistości obserwuje się odchylenie od prostoliniowości spowodowane na początku pomiaru charakterystyki C-t dodatkową generacją powierzchniową, generacją wprowadzaną przez defekty i efektami związanymi z dużym natężeniem pola elektrycznego. Pod koniec pomiaru C-t przebieg  $J_g$  w funkcji  $w_g$  związany jest nie tylko z tłumieniem generacji przez rekombinację, ale może być zależny do zmian  $\tau_g$  z odległością od powierzchni  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  (np. przy istnieniu profilu rozkładu domieszek lub nierównomiernym przestrzennie rozkładzie pułapek). Ponadto o prądzie  $J_g$  może decydować stałe (w czasie) źródło dostarczania nośników z obszaru quasi-neutralnego (objętość półprzewodnika poza obszarem zubożonym) [15].

Wykres Zerbsta dla kondensatora MOS przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Krzywa Zerbsta kondensatora MOS

## 5. WYNIKI POMIARÓW

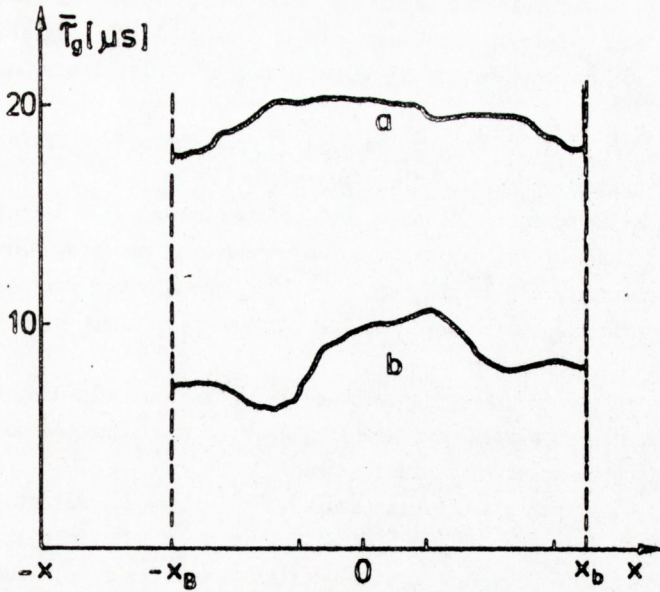
Średnie wartości czasów życia nośników mniejszościowych w warstwie epitaksjalnej odpowiednio dla dwóch rodzajów płytek n/n<sup>+</sup> przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Średnie wartości czasów życia

Lp.	Grupa	$\bar{\tau}_g$ [μs]		Obróbka laserowa
		niegetterowana	getterowana	
1	IA	7,0	14,5	1/2 płytki
2		6,5	13,6	1/2 płytki
3		-	15,5	cała płytka
4		-	13,0	cała płytka
5	IB	-	19,0	cała płytka
6		-	17,8	cała płytka
7		6,2	płytko odniesienia	
8		8,9	płytko odniesienia	
9		5,8	płytko odniesienia	
10	II	12,5	22,7	1/2 płytki
11		16,3	23,5	1/2 płytki
12		-	25,5	cała płytka
13		-	24,8	cała płytka
14		15,0	płytko odniesienia	
15		17,9	płytko odniesienia	



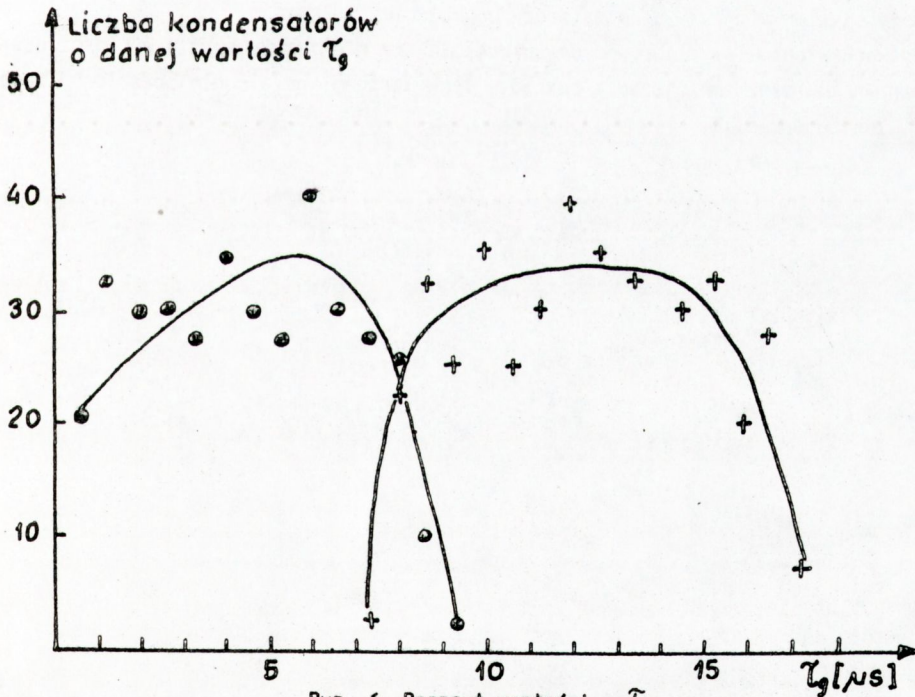


Średnica płytki

Rys. 5. Rozkład średnich wartości  $\bar{\tau}_g$  w warstwie epitaksyjnej dla płytki z grupy IA, oraz płytki odniesienia wzdłuż osi x w sektorach A i B (patrz rys. 3)

a - płytki getterowana,

b - płytki odniesienia



Rys. 6. Rozrzut wartości  $\tau_g$

+ - płytki z grupy IA

o - płytki odniesienia

Dla części płytek proces uszkodzania płytki impulsem laserowym przeprowadzony był dla połowy płytki. Umożliwiało to porównanie dla tej samej płytki z warstwą epitakcyjną wartości  $\tau_g$  w warstwie osadzonej na getterowanej i niegetterowanej połowie płytki.

Średnia wartość  $\bar{\tau}_g$  jest średnią z pomiarów 50 kondensatorów w sektorach A, B, C (rys. 3) dla każdej połowy płytki lub dla całej płytki.

Można zauważyć, że getterowanie laserowe spowodowało około 1,5 ÷ 3-krotne zwiększenie czasu życia nośników. Płytki odniesienia (na których nie przeprowadzono obróbki laserowej) charakteryzowały się wartościami  $\bar{\tau}_g$  porównywalnymi z wartościami  $\bar{\tau}_g$  uzyskanymi na częściach niegetterowanych płytek w połowie poddanych procesowi obróbki laserowej.

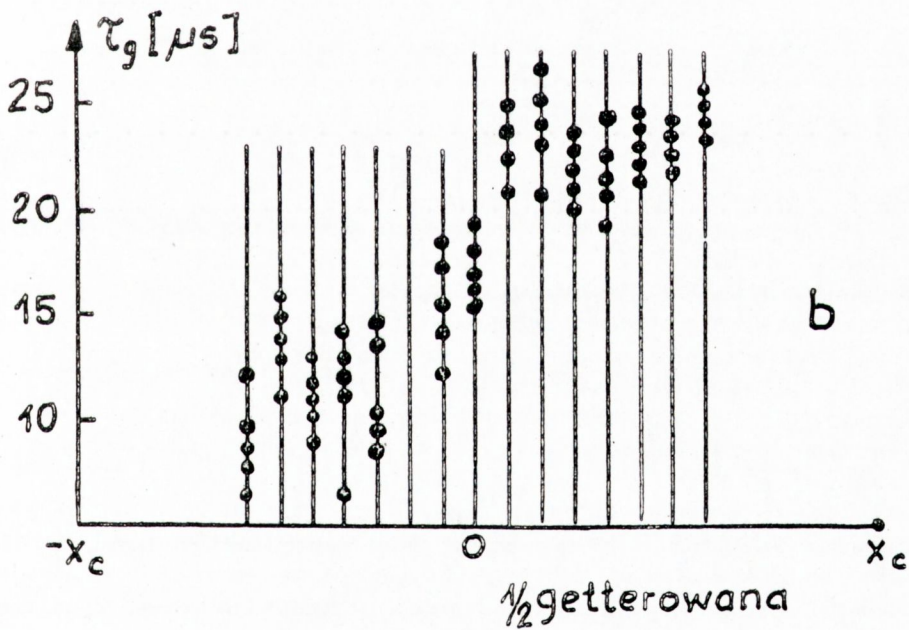
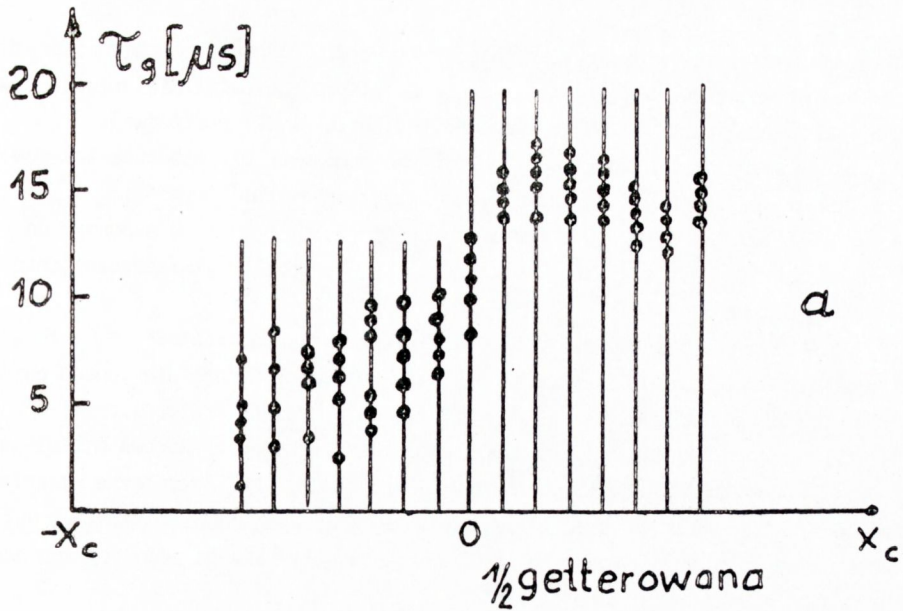
Nie ujawniła się tendencja zmniejszania czasu życia nośników dla niegetterowanej połowy płytki w stosunku do płytek odniesienia. Świadczy to, że proces obróbki laserowej nie wnosi dodatkowych trwałych zanieczyszczeń.

Obok bezwzględnej wartości czasu życia nośników  $\tau_g$  o jakości materiału i technologii decyduje rozrzut tych wartości na płytce. Pomiar wykazały zmniejszenie rozrzutu  $\hat{\tau}_g$  na płytkach (lub w częściach płytek) getterowanych laserowo. Ilustruje to rys. 5. Z porównania wartości  $\hat{\tau}_g$  uzyskanych na płytce getterowanej i niegetterowanej wynika również, że obróbka laserowa wpłynęła na ujednoczenie wartości  $\hat{\tau}_g$  na poziomie zbliżonym do maksymalnych, osiąganych dla danej płytki wartości.

Obraz rozrzutu wartości  $\hat{\tau}_g$  dla całej płytki poddanej obróbce laserowej (płytką z grupy IA) i płytki odniesienia, określany dla około 400 kondensatorów z sektorów A, B, C i przedstawiony na rys. 6, potwierdza poprzednie obserwacje.

Na płytkach w połowie getterowanych uwiadczenia się efekt zwiększenia wartości czasu życia nośników oraz zmniejszenia rozrzutu tych wartości po stronie obrabianej laserowo, co ilustruje rys. 7.





Rys. 7. Rozkład wartości  $\tau_g$  wzdłuż pasa powierzchni ograniczonego osiami ( $x$ ,  $y_{III}$ ) oraz ( $x$ ,  $y_D$ ) w sektorach A i B (połowa płytki getterowana laserowo)  
 a - płytką z grupy IA      b - płytką z grupy II

## 6. PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki pomiarów generacyjnego czasu życia nośników mniejszościowych w krzemowej warstwie epitaksjalnej wskazują na getterujące działanie uszkodzeń wprowadzanych impulsami lasera Nd:YAG na tylną powierzchnię płytki podłożowej.

Dla warstw osadzanych na płytkach podłożowych poddanych mikroobróbce laserowej przed procesem epitaksji nastąpił około dwu-trzykrotny wzrost wartości  $\tau_g$  i 20% zmniejszenie rozrzutu  $\tau_g$  (w zakresie  $\tau_g > 0,7 \tau_{g \text{ maks.}}$ ) w stosunku do płytek odniesienia. Mniejszy wzrost wartości  $\tau_g$  cechował płytki poddane obróbce po procesie epitaksji.

Dla płytek z grupy I zaobserwowano niewielkie różnice we wzroście  $\tau_g$  związane z różnymi warunkami obróbki laserowej. Bardziej korzystny wydaje się sposób obróbki laserowej zastosowany dla płytek z grupy IB (większa gęstość kraterów).

Płytki po procesie epitaksji (pierwsza operacja wysokotemperaturowa dla płytek grupy I) przechodziły tylko cykl wytwarzania kondensatora MOS (termiczne utlenianie).

Mimo zbyt krótkiego etapu operacji wysokotemperaturowych zaobserwowany wzrost czasów życia świadczy o przydatności metody laserowego getterowania zewnętrznego dla płytek krzemowych z warstwą epitaksjalną.

## BIBLIOGRAFIA

1. Borland J.O., Deacon T.: Solid State Technology, 8, 1984, 123
2. Chen M.C., Silvestri V.J.: J. Electrochem. Soc., 129, 1982, 1294
3. Dziesiaty J., Wencel K.: Proc. of 2nd International Autumn Meeting GADEST 87, Garzau, Oct. 11-17, 1987, 292
4. Salih A.S.M. et al: J. Electrochem. Soc., 1986, 133
5. Eggermont G.E. et al: Solid State Technology, 11, 1983, 171
6. Pearce C.W., Zaleckas V.J.: J. Electrochem. Soc., 126, 1979, 1436
7. Hayafuji Y. et al: J. Electrochem. Soc., 128, 1981, 1975
8. Eggermont G.E. et al: Proc. of MRS Annual Meeting, Boston, Nov. 1981, 615
9. Patent USA 4 249 962
10. Patent USA 4 257 827
11. Magee T.J., Keith McNab T.: Solid State Technology, 12, 1982, 101
12. Takemura K. et al: Proc. of 2nd International Autumn Meeting GADEST 87, Garzau, Oct. 11-17, 1987, 318
13. Nowicki M., Niechoda Z.: Materiały III Konferencji Technologia Elektronowa, Poznań, czerwiec 22-25, 1987, 84
14. Zerbát M.: Z. Angew. Phys., 22, 1966, 30
15. Siennicki A.: Metody identyfikacji parametrów generacyjno-rekombinacyjnych w testowych strukturach MOS, rozprawa doktorska, Warszawa: Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki 1989, 183