

BADANIE CENTRÓW DEFIEKTOWYCH W HETEROSTRUKTURACH LASEROWYCH AlGaAs/ GaAs ZE STUDNIĄ KWANTOWĄ GaAsP

Paweł Kamiński¹, Michał Kozubal¹, Roman Kozłowski¹, Anna Kozłowska^{1,2},
Marian Teodorczyk¹

Metodę niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej (DLTS) zastosowano do badania centrów defektowych w laserach heterozłączowych AlGaAs/GaAs ze studnią kwantową GaAsP emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda = 808$ nm. W warstwach falowodowych laserów wykryto 5 pułapek oznaczonych jako T1a, T1b, T2, T3 i T4 o energii aktywacji odpowiednio 205, 215, 370, 380 i 470 meV. Pułapki T1a (205 meV), T2 (370 meV), T3 (380 meV) i T4 (470 meV) zidentyfikowane zostały jako pułapki elektronowe występujące w niedomieszkowanej warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu *n*. Stwierdzono ponadto, że pułapki T2, T3, T4 są centrami *DX* zlokalizowanymi w otoczeniu o różnej konfiguracji atomowej, spowodowanej fluktuacjami składu warstwy $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. W szczególności dominujące pułapki T3 (380 meV) są centrami *DX* zlokalizowanymi w sąsiedztwie jednego atomu Al i dwóch atomów Ga. W laserach nie poddanych starzeniu koncentracja tych pułapek jest dwukrotnie większa od koncentracji pułapek T4 (470 meV), pięciokrotnie większa od koncentracji pułapek T1a (205 meV) i T2 (370 meV) oraz ponad trzykrotnie większa od koncentracji pułapek T1b (215 meV). W wyniku procesu starzenia najsilniej (ponad dwukrotnie) wzrasta koncentracja pułapek T2 (370 meV). W przybliżeniu dwukrotny wzrost koncentracji obserwowany jest również w przypadku pułapki T1a (205 meV). W obszarze studni kwantowej wykryto 3 pułapki elektronowe charakteryzujące się energią aktywacji równą odpowiednio 200, 205 i 250 meV, które przypisano centrom *DX* zlokalizowanym w otoczeniu o różnej konfiguracji atomów arsenu i fosforu, spowodowanej fluktuacjami składu warstwy $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$. W obszarze tym wykryto ponadto pułapki o energii aktywacji 310 meV, które związane są prawdopodobnie z rodzimymi defektami punktowymi generowanymi wskutek wspinania się dyslokacji nachylonych pochodzących od dyslokacji niedopasowania.

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: pawel.kaminski@itme.edu.pl

² Obecnie Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

1. WSTĘP

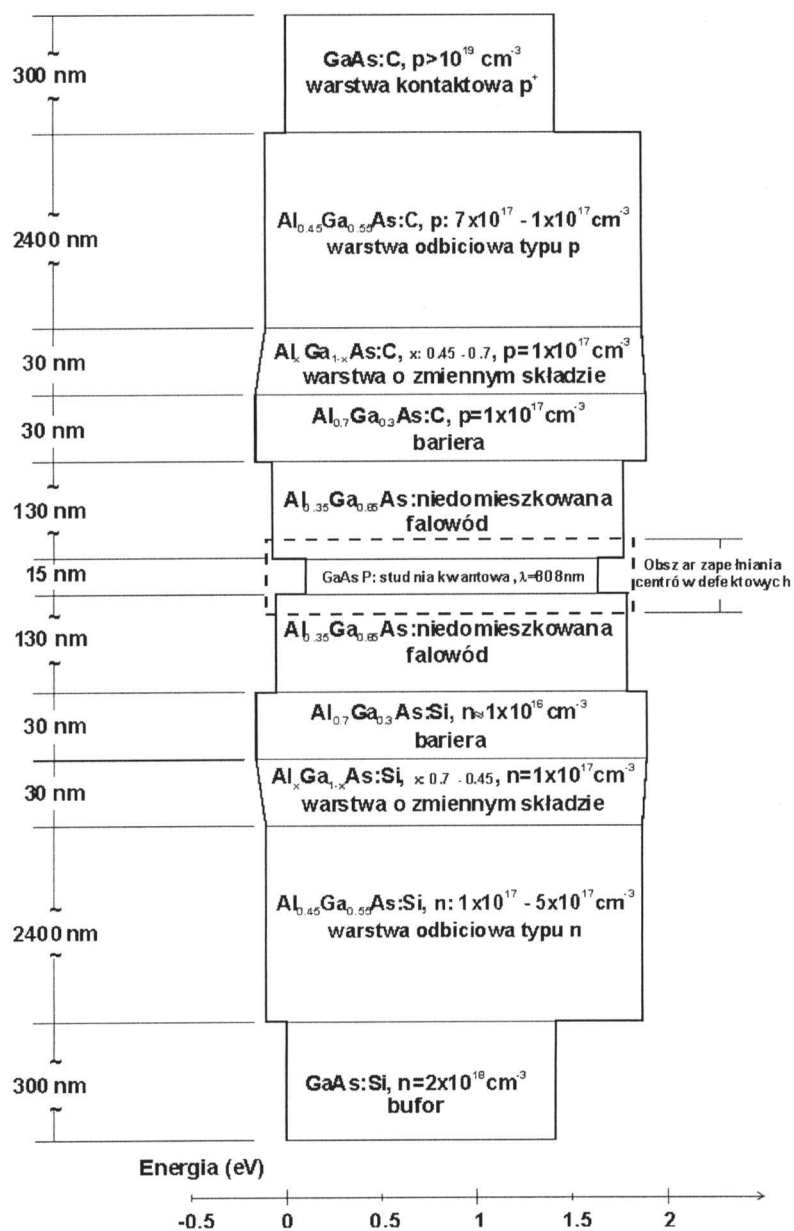
Lasery heterozłączone typu SCH (*Separate Confinement Heterostructure*) należą do grupy nowoczesnych półprzewodnikowych źródeł promieniowania charakteryzujących się dużą sprawnością kwantową oraz niską gęstością prądu progowego. Właściwości te uzyskiwane są dzięki wstrzykiwaniu nośników ładunku do studni kwantowej i wydajnej rekombinacji promienistej. Z punktu widzenia zastosowań laserów oprócz mocy i energii kwantu emitowanego promieniowania bardzo duże znaczenie ma stabilność ich pracy i niezawodność. Poznanie mechanizmów wpływających na niezawodność jest niezbędne dla otrzymania laserów charakteryzujących się długim czasem pracy.

Celem przedstawionych w artykule badań było zastosowanie niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej (*Deep Level Transient Spectroscopy* – DLTS) do monitorowania zmian zachodzących w strukturze defektowej warstw epitaksjalnych tworzących obszar czynny heterozłączowych laserów AlGaAs/GaAs ze studnią kwantową GaAsP emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda = 808$ nm. Mechanizmy powodujące te zmiany nie zostały dotychczas dostatecznie poznane. Wiadomo jednak, że struktura defektowa materiału obszaru czynnego laserów heterozłączowych jest bardzo złożona. W materiale tym występują bowiem naprężenia, dyslokacje oraz defekty punktowe związane z przesunięciami atomów rodzimych z pozycji węzłowych lub obecnością atomów domieszek i zanieczyszczeń. W warstwie AlGaAs na granicy z podłożem GaAs generowane są dyslokacje niedopasowania będące źródłem dyslokacji nachylonych, które w procesie wspinania z udziałem defektów punktowych przemieszczają się do obszaru czynnego. Energia uwalniana podczas pracy laserów powoduje relaksację naprężeń, w wyniku której następuje migracja defektów punktowych i wzrost ich koncentracji w obszarze czynnym.

2. OPIS PRÓBEK

Do badania centrów defektowych metodą DLTS wybrano chipy laserów heterozłączowych (AlGa)As/GaAs ze studnią kwantową GaAsP. Warstwy tworzące heterostrukturę osadzone zostały na silnie domieszkowanym podłożu GaAs typu *n*. Wszystkie chipy pochodziły z jednej heterostruktury oznaczonej jako #277, której schemat przedstawiono na Rys. 1.

Zilustrowany na Rys. 1 układ warstw epitaksjalnych wskazuje, że badane lasery heterozłączone są typu DB SCH (*Double-Barrier Separate Confinement Heterostructure*). Warstwą czynną tych laserów jest studnia kwantowa $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ o grubości 15 nm. Skład tej warstwy został tak dobrany ($x \approx 0.1$), aby szerokość przerwy energetycznej wynosiła 1.53 eV i w wyniku rekombinacji elektronów i dziur



Rys. 1. Układ warstw epitaksjalnych w laserze heterozłączowym AlGaAs/GaAs ze studnią kwantową GaAsP.

Fig. 1. Schematic illustration of the epitaxial layers arrangement in laser heterostructures of AlGaAs/GaAs with GaAsP quantum well.

wstrzykiwanych do studni kwantowej emitowane było promieniowanie o długości fali 808 nm. Warstwa czynna wbudowana jest w falowód utworzony przez dwie nie domieszkowane warstwy $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, w którym generowane promieniowanie jest utrzymywane i wzmacniane do poziomu równoważącego straty na zwierciadłach tworzących rezonator. Bariery utworzone przez warstwy $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ i $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ po stronie typu n oraz typu p zapewniają bardzo dobrą sprawność wstrzykiwania nośników ładunku i możliwość uformowania poprzecznego rozkładu pola optycznego fali prowadzonej.

Próbkami wykorzystanymi do badania centrów defektowych były zarówno chipy laserowe zamontowane na przepustach TO, jak i chipy niepoddane montażowi. Należy dodać, że lasery dostarczone na przepustach TO przepracowały uprzednio 1000 h i niektóre z nich dodatkowo poddane zostały starzeniu przez ponad 800 h w temperaturze 20°C. Opis próbek wybranych do badania centrów defektowych przedstawiono w Tab. 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów struktur laserów heterozłączowych wykorzystanych do badania centrów defektowych.

Table 1. Characteristics of laser heterostructures used for investigation of defect centres.

Lp..	Nazwa lasera	Charakterystyka lasera
1	fb11c3_2c	Chip, prąd progowy 168.7 mA, sprawność przyrostowa 1.067 W/A
2	fb11c2_2b	Chip, prąd progowy 160.9 mA, sprawność przyrostowa 1.082 W/A
3	fb11c1	Chip, prąd progowy 156.2 mA, sprawność przyrostowa 1.052 W/A
4	fb11c0_2a	Chip, prąd progowy 164.9 mA, sprawność przyrostowa 1.049 W/A
5	fb12b2	Chip, prąd progowy 165 mA, sprawność przyrostowa 1.04 W/A
6	TO_fb10d3	Praca przez 1001 h, prąd progowy 190 mA, następnie brak akcji laserowej
7	TO_fb10e6	Praca przez 1067 h; starzenie przez 845 h (punkt pracy: 1.87 V, 0.42 A); po starzeniu: moc 263 mW, prąd progowy 180 mA
8	TO_fb10e5	Praca przez 1000 h; starzenie przez 865 h (punkt pracy: 1.88 V, 0.42 A); po starzeniu: moc 254 mW, prąd progowy 200 mA

Jak wskazują dane przedstawione w Tab. 1 przed procesem starzenia poszczególne lasery charakteryzowały się zbliżonymi wartościami prądu progowego w zakresie 156-170 mA, a także zbliżonymi wartościami sprawności przyrostowej,

wynoszącej ~ 1 W/A. W wyniku starzenia moc promieniowania laserów zmniejszyła się z ~ 300 mW do wartości ~ 260 mW, zaś prąd progowy wzrósł od ~ 160 mA do ~ 190 mA. Tak więc, podczas starzenia przez ~ 1900 h parametry laserów GaAsP/AlGaAs/GaAs ulegają znaczącej degradacji. Mechanizmy tej degradacji nie zostały dotychczas w pełni poznane i są przedmiotem intensywnych badań [1-4]. Obserwacje przeprowadzone za pomocą kamery termowizyjnej ujawniły w strukturach laserowych obecność obszarów, z których zachodzi emisja promieniowania o długości fali ~ 2 μm (próbka TO_fb10d3). Przyczyna tego promieniowania nie została dotychczas określona, a w szczególności brak jest danych potwierdzających, czy promieniowanie to generowane jest wskutek rekombinacji nośników ładunku z udziałem głębokich poziomów, czy też spowodowane jest emisją termiczną wskutek lokalnego wzrostu gęstości prądu [1-2, 5]. Z drugiej strony degradacja parametrów laserów może być spowodowana wzrostem koncentracji defektów punktowych w wyniku przekazywania energii uwalnianej w procesie rekombinacji do sieci krystalicznej. Mechanizm ten może być zaobserwowany poprzez pomiar widm DLTS [6].

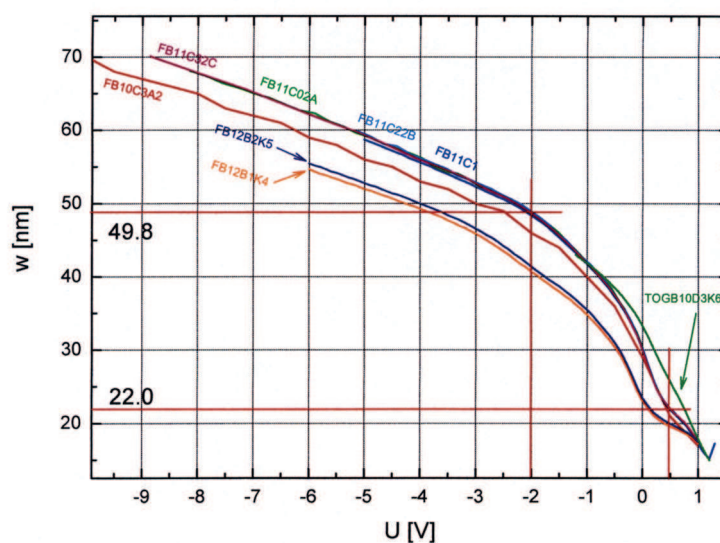
3. CENTRA DEFEKTOWE W STRUKTURACH LASEROWYCH

Heterostruktury laserowe GaAsP/AlGaAs/GaAs nie są próbkami pozwalającymi na wykorzystanie w pełni metody DLTS. Modele wykorzystywane do interpretacji wyników uzyskiwanych tą metodą dotyczą bowiem asymetrycznych złącz p^+-n lub n^+-p . Jak wskazuje układ warstw epitaksjalnych przedstawiony na Rys. 1 pomiędzy obszarem $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}:\text{C}$ typu p i obszarem $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}:\text{Si}$ typu n występują dwie nie domieszkowane warstwy falowodowe $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ oraz nie domieszkowana warstwa GaAsP będąca studnią kwantową. Badania przeprowadzone metodą spektrometrii mas jonów wtórnych (*Secondary Ion Mass Spectrometry* - SIMS) wykazały, że warstwa falowodowa pomiędzy studnią kwantową, a warstwą $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}:\text{C}$ jest typu p , natomiast warstwa falowodowa pomiędzy studnią kwantową a warstwą $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}:\text{Si}$ jest typu n . W celu zapewnienia dużej sprawności wstrzykiwania elektronów [7], warstwa studni kwantowej jest typu p . Tak więc, w badanej heterostrukturze złącze $p-n$ jest symetrycznym złączem skokowym i warstwa ładunku przestrzennego wnika zarówno w obszar typu n , jak i obszar typu p . Z punktu widzenia pomiaru charakterystyk pojemnościowo-napięciowych badana heterostruktura laserowa jest kondensatorem płaskim, w którym obszar ładunku przestrzennego obejmuje studnię kwantową oraz wnika częściowo w przeciwnego typu warstwy falowodowe (Rys. 1). W celu określenia parametrów centrów defektowych w warstwach falowodowych pomiary widm DLTS należy zatem prowadzić przy polaryzacji w kierunku zaporowym, stosując impulsy zapewniające, zmieniające napięcie polaryzacji do wartości bliskiej zera. Dla określenia parametrów pułapek w studni kwantowej pomiary widm DLTS powinny być prowadzone przy napięciu polaryzacji bliskim lub równym zeru

oraz przy amplitudzie impulsu zapewniającego, zmieniającego napięcie polaryzacji do wartości powyżej +1 V. Należy dodać, że w wyniku zmiany napięcia polaryzacji w warstwach falowodowych pułapki zapełniane są nośnikami większościowymi, zaś w obszarze studni kwantowej pułapki zapełniane są nośnikami mniejszościowymi.

3. 1. CHARAKTERYSTYKA CENTRÓW DEFETYKTYCH W WARSTWACH FALWODOWYCH $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$

Zmiany szerokości warstwy ładunku przestrzennego w funkcji przyłożonego napięcia w kierunku zaporowym określone na podstawie charakterystyk pojemnościowo-napięciowych ilustruje Rys. 2. Przyjmując, że fizyczna granica obszarów typu n i typu p jest na styku nie domieszkowanej warstwy falwodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n oraz studni kwantowej, można oszacować głębokości wnikania warstwy ładunku przestrzennego w poszczególne warstwy heterostruktury (Rys. 1). Wyniki przedstawione na Rys. 2 wskazują, że przy napięciu wstecznym -2 V szerokość warstwy ładunku przestrzennego wynosi ~ 50 nm. Biorąc pod uwagę zbliżone wartości koncentracji donorów akceptorów, można przyjąć, że warstwa ładunku przestrzennego z jednej strony obejmuje obszar studni kwantowej typu p o szerokości 15 nm oraz częściowo



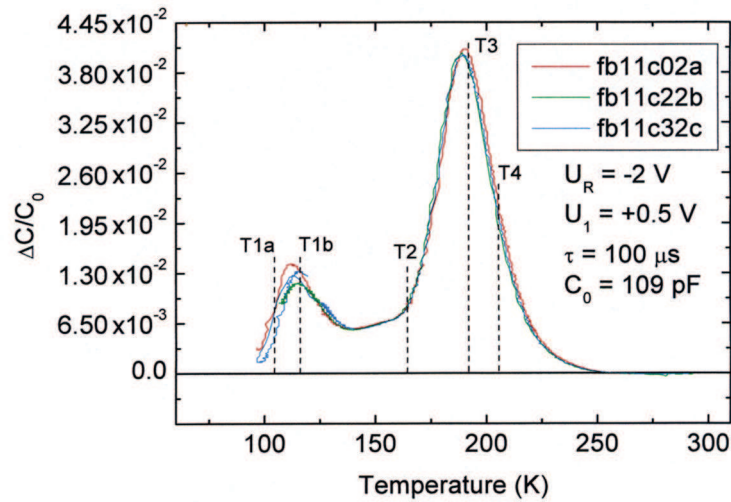
Rys. 2. Zależności szerokości warstwy ładunku przestrzennego od przyłożonego napięcia w kierunku zaporowym dla wybranych heterostruktur laserowych. Przedstawione zależności otrzymane zostały na podstawie charakterystyk pojemnościowo-napięciowych.

Fig. 2. Characteristics of space charge width versus applied voltage obtained from capacitance measurements for selected laser heterostructures.

wnika w warstwę falowodową $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu p na głębokość ~ 10 nm, z drugiej zaś wnika w warstwę falowodową $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n na głębokość ~ 25 nm. Przy napięciu $+0.5$ V szerokość warstwy ładunku przestrzennego wynosi ~ 22 nm i obejmuje obszar studni kwantowej o szerokości 11 nm oraz wnika w warstwę falowodową $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n na głębokość ~ 11 nm. Tak więc, w wyniku zmiany napięcia polaryzacji od -2 do $+0.5$ V zmiany szerokości warstwy ładunku przestrzennego w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n , w obszarze studni kwantowej GaAsP oraz w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu p wynoszą odpowiednio 14 nm, 4 nm i 10 nm. Dane te wskazują, że najszerszy obszar, w którym centra defektowe wypełniane są większościowymi nośnikami ładunku znajduje się w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n . Zatem, w wyniku pomiaru widm DLTS obserwowana jest głównie termiczna emisja elektronów z pułapek znajdujących się w tym obszarze. Nie można jednak wykluczyć termicznej emisji dziur z obszaru warstwy falowodowej typu p .

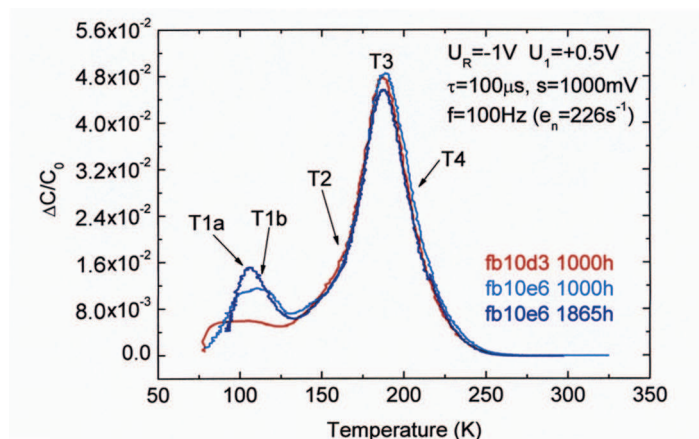
Na Rys. 3 przedstawiono widma DLTS dla heterostruktur laserowych GaAsP/AlGaAs/GaAs przed procesem starzenia. Należy zwrócić uwagę, że oś rzędnych wyskalowano w wartościach $\Delta C/C_0$, będących miarą koncentracji pułapek dla każdego piku w widmie DLTS [3-4]. ΔC oznacza wartość bezwzględną zmiany pojemności warstwy ładunku przestrzennego wskutek wypełnienia pułapek większościowymi nośnikami ładunku, zaś C_0 jest pojemnością tej warstwy w stanie ustalonym przy napięciu wstecznym -2 V. Widoczne są niewielkie różnice pomiędzy widmami dla poszczególnych struktur. Otrzymane dane wskazują, że przed procesem starzenia w strukturach występuje 5 pułapek oznaczonych jako T1a, T1b, T2, T3 i T4. Największą amplitudą, proporcjonalną do koncentracji pułapek, charakteryzują się piki odpowiadające pułapkom T3 i T4. Na podstawie danych eksperymentalnych nie można jednak bezpośrednio stwierdzić, które pułapki są pułapkami elektronowymi pochodzącymi z warstwy falowodowej typu n , a które są pułapkami dziurowymi pochodzącymi z warstwy falowodowej typu p .

Rys. 4 ilustruje widma DLTS dla struktur laserowych poddanych procesowi starzenia w temperaturze 20 °C. Otrzymane wyniki wskazują, że w wyniku procesu starzenia nie powstają nowe pułapki, natomiast ulega zmianie koncentracja pułapek wykrytych w heterostrukturze przed starzeniem. W szczególności z porównania widm przedstawionych na Rys. 3 i Rys. 4 widoczny jest wzrost koncentracji pułapek T2 oraz pułapek T3. Należy zwrócić uwagę, że w wyniku wydłużenia czasu starzenia z 1000 do 1865 h występuje pewien wzrost koncentracji pułapek T1a i T1b oraz niewielki spadek koncentracji pułapek T3. Wyniki te ilustrują zmiany zachodzące w strukturze defektowej warstw falowodowych lasera $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ podczas procesu starzenia.



Rys. 3. Porównanie widm DLTS otrzymanych w zakresie temperatur 90-300 K dla trzech chipów laserowych (próbki z serii fb11) przed procesem starzenia. Okno szybkości termicznej emisji wynosi 226 s^{-1} . Linie przerywane wskazują temperaturę, w której szybkość emisji nośników ładunku z pułapek T1a, T1b, T2, T3 i T4 wynosi 226 s^{-1} . ΔC , C_0 i τ oznaczają odpowiednio wartość bezwzględną zmiany pojemności warstwy ładunku przestrzennego wskutek zapełnienia pułapek większościowymi nośnikami ładunku, pojemność tej warstwy w stanie ustalonym przy napięciu wstecznym $U_R = -2 \text{ V}$ i czas trwania impulsu zapełniającego.

Fig. 3. Comparison of DLTS spectra taken in the temperature range of 90-300 K for three laser chips before aging process. Thermal emission rate window is 226 s^{-1} . The dashed lines mark the temperatures corresponding to the thermal emission rate of charge carriers from traps T1a, T1b, T2, T3 i T4 equal to 226 s^{-1} . ΔC , C_0 and τ denote the absolute value of the change in the space charge layer capacitance due to filling the traps with the majority carriers, the capacitance under quiescent reverse bias $U_R = -2 \text{ V}$, and filling pulse duration time, respectively.



Rys. 4. Porównanie widm DLTS otrzymanych w zakresie temperatur 80-300 K dla trzech chipów laserowych (próbki z serii fb10) poddanych procesowi starzenia w czasie od 1000 do 1865 h. Okno szybkości termicznej emisji wynosi 226 s^{-1} . Strzałkami zaznaczono punkty odpowiadające szybkości termicznej emisji nośników ładunku z pułapek T1a, T1b, T2, T3 i T4 równej 226 s^{-1} . ΔC , C_0 i τ oznaczają odpowiednio wartość bezwzględną zmiany pojemności warstwy ładunku przestrzennego wskutek zapełnienia pułapek większościowymi nośnikami ładunku, pojemność tej warstwy w stanie ustalonym przy napięciu wstecznym $U_R = -1 \text{ V}$ i czas trwania impulsu zapełniającego.

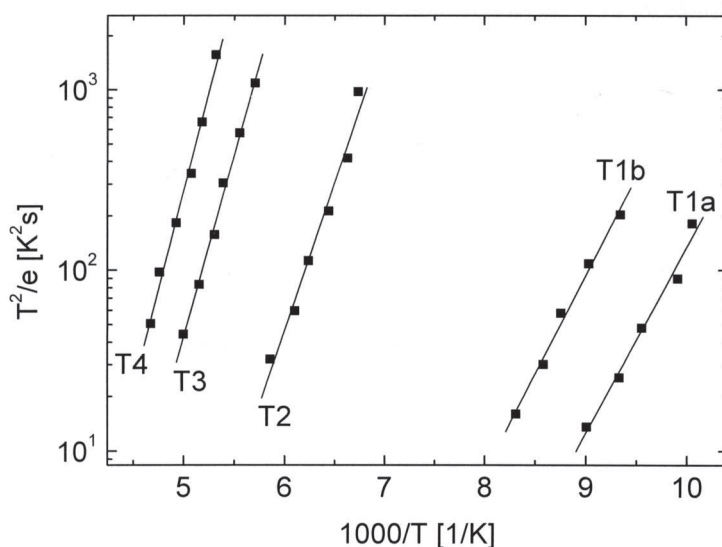
Fig. 4. Comparison of DLTS spectra taken in a temperature range of 80-300 K for three laser chips subjected to aging processes. Thermal emission rate window is 226 s^{-1} . The arrows mark the temperatures corresponding to the thermal emission rate of charge carriers from traps T1a, T1b, T2, T3 and T4 equal to 226 s^{-1} . ΔC and C_0 denote the absolute value of the change in the space charge layer capacitance due to filling the traps with the majority carriers and the capacitance under quiescent reverse bias $U_R = -1 \text{ V}$, and filling pulse duration time, respectively.

Na Rys. 5 przedstawiono wykresy Arrheniusa dla centrów defektowych wykrytych w warstwach falowodowych $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$. Wszystkie pułapki obserwowane były zarówno przed, jak i po procesie starzenia. Na podstawie tych wykresów wyznaczono energię aktywacji E_a oraz współczynnik A w równaniu Arrheniusa

$$e = AT^2 \exp(-E_a/kT), \quad (1)$$

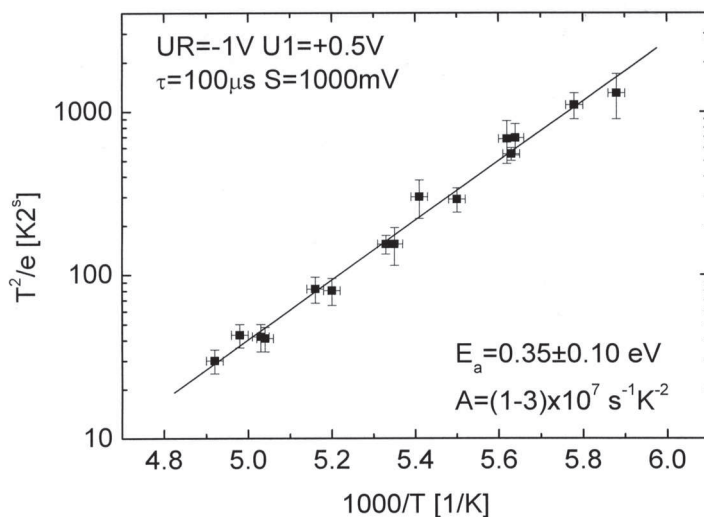
określającym zależność szybkości emisji nośników ładunku e w funkcji energii kT , gdzie k oznacza stałą Boltzmanna, zaś T - temperaturę. Współczynnik A jest iloczynem stałej materiałowej, zależnej od masy efektywnej elektronów lub dziur, oraz przekroju czynnego na wychwyty nośników ładunku. Należy dodać, że różnice pomiędzy wykresami Arrheniusa dla centrów defektowych w poszczególnych próbkach spowodowane błędem pomiaru temperatury były niewielkie. Przykładowo,

różnice te zilustrowano na Rys. 6 przedstawiającym wykres Arrheniusa dla pułapek T3 wykrytych w próbkach po procesie starzenia.



Rys. 5. Temperaturowe zależności szybkości emisji nośników ładunku w zakresie temperatur 90-300 K dla pułapek wykrytych w warstwach falowodowych $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$.

Fig. 5. Temperature dependences of the emission rate of charge carriers determined in the temperature range of 90-300 K for traps detected in the $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ waveguide layers.



Rys. 6. Wykres Arrheniusa dla centrów defektowych T3 wykrytych w warstwach falowodowych heterostruktur laserowych (próbki z serii fb10) poddanych procesowi starzenia. Widoczne rozrzuty punktów spowodowane są błędem pomiaru temperatury próbek.

Fig. 6. Arrhenius plot for defect centres T3 detected in the waveguide layers of the heterostructure lasers (samples of series fb10) after aging. Scattering of data points is due to an error of the samples temperature measurement.

W Tab. 2 zestawiono parametry pułapek wykrytych w warstwach falowodowych $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ heterostruktur laserowych oraz podano wartość średnią temperatury T_m , określającej położenie danego pików w widmie DLTS dla okna szybkości emisji 226 s^{-1} . W tabeli tej zamieszczono również wartości przekroju czynnego na wychwyty elektronów σ_n lub dziur σ_p , określone na podstawie wartości współczynnika A odpowiednio przy założeniu, że dane pułapki są pułapkami elektronowymi w warstwie falowodowej typu n lub pułapkami dziurowymi w warstwie falowodowej typu p .

Tabela 2. Zestawienie parametrów centrów defektowych wykrytych w warstwach falowodowych $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ heterostruktur laserowych.

Table 2. Summary of parameters of defect centres detected in the $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ waveguide layers of heterostructure lasers.

Symbol pułapki	E_a [meV]	A [$\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$]	σ_n (cm^2)	σ_p (cm^2)	T_m [K] dla $e_n=226 \text{ s}^{-1}$
T1a	205±10	1×10^8	6×10^{-13}	8×10^{-14}	104±2
T1b	215±10	7×10^7	3×10^{-13}	4×10^{-14}	116±2
T2	370±50	$(1-300) \times 10^8$	$6 \times 10^{-13}-3 \times 10^{-10}$	$8 \times 10^{-14}-2 \times 10^{-11}$	164±4
T3	380±65	$(1-200) \times 10^7$	$4 \times 10^{-14}-9 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-15}-1 \times 10^{-12}$	191±4
T4	470±35	$(3-90) \times 10^8$	$1 \times 10^{-12}-4 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-13}-5 \times 10^{-12}$	205±2

Z przedstawionych danych wynika, że energia aktywacji wykrytych pułapek zawiera się w przedziale od 205 do 470 meV, zaś przekroje czynne na wychwyty nośników ładunku są w zakresie $10^{-14}-10^{-10} \text{ cm}^2$. Na podstawie dostępnych danych literaturowych [8] pułapki T1a ($205 \pm 10 \text{ meV}$) mogą być identyfikowane z elektronowymi pułapkami o energii aktywacji 0.22 eV i przekroju czynnym na wychwyty elektronów równym $9 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ obserwowanymi w studniach kwantowych $\text{GaAs}/n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.24-0.39$). Można zatem przyjąć, że obserwowana w widmach DLTS termiczna emisja elektronów z tych pułapek zachodzi w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ przylegającej do bariery $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As:Si}$ typu n .

W przypadku pułapek T1b ($215 \pm 10 \text{ meV}$) brak jest danych literaturowych umożliwiających przypisanie tych pułapek centrom defektowym obserwowanym dotychczas metodą DLTS w warstwach AlGaAs . Warto jednak dodać, że dla heterostruktur $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.81}\text{Al}_{0.10}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ w widmach fotoprądu obserwowano emisję nośników ładunku z poziomu $\Delta E_3 = (0.185 \pm 0.02) \text{ eV}$ [5]. Na podstawie danych literaturowych nie można więc stwierdzić czy pułapki T1b są pułapkami elektronowymi, czy też pułapkami dziurowymi. Parametry pułapek T2 ($370 \pm 50 \text{ meV}$) są porównywalne z parametrami pułapek dziurowych, charakteryzujących się energią aktywacji 0.42 eV i przekrojem czynnym na wychwyty dziur równym $3.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, wykrytych w warstwie $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As:Zn}$ typu p [9]. Pułapki te mogą więc być

związane z defektami punktowymi występującymi w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ przylegającej do bariery $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As:Zn}$ typu p . Z drugiej strony, pułapki T2 (370 ± 50 meV) mogą być identyfikowane z elektronowymi pułapkami P0 ($E_a = (0.33 \pm 0.01)$ eV, $\sigma_n = 2.1 \times 10^{-13}$ cm²), obserwowanymi metodą DLTS w warstwach $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As:Si}$ otrzymanych metodą MBE [10]. Zgodnie z modelem przedstawionym w pracy [10] pułapki P0 są centrami DX zlokalizowanymi w otoczeniu trzech atomów Ga. Różna konfiguracja atomowa w otoczeniu centrów DX możliwa jest wskutek fluktuacji składu roztworu stałego AlGaAs. Należy dodać, że zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy [11] centra DX w warstwach $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As:Si}$ mogą charakteryzować się energią aktywacji $E_a = 0.36$ eV i przekrojem czynnym na wychwytywanie elektronów $\sigma_n = 5 \times 10^{-14}$ cm², zaś koncentracja tych centrów może być rzędu 1×10^{18} cm⁻³. Parametry pułapek T3 (380 ± 65 meV) wskazują, że pułapki te mogą być identyfikowane z pułapkami P1 ($E_a = (0.40 \pm 0.01)$ eV, $\sigma_n = 4 \times 10^{-13}$ cm²), które w warstwach $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As:Si}$ są również centrami DX , zlokalizowanymi w otoczeniu jednego atomu Al i dwóch atomów Ga [10]. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy [10] pułapki T4 (470 ± 35 meV) mogą być identyfikowane z pułapkami P2 ($E_a = (0.43 \pm 0.01)$ eV, $\sigma_n = 3.5 \times 10^{-13}$ cm²), które są również centrami DX zlokalizowanymi w otoczeniu dwóch atomów Al i jednego atomu galu. W widmach fotoprądu dla heterostruktur $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.81}\text{Al}_{0.10}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ centra te mogą manifestować się poprzez przejścia elektronów z poziomu $\Delta E_2 = (0.51 \pm 0.03)$ eV do pasma przewodnictwa [5]. Tak więc, w świetle dostępnych danych literaturowych można przyjąć, że pułapki T1a (205 meV), T2 (370 meV), T3 (380 meV) i T4 (470 meV) są pułapkami elektronowymi związanymi z defektami punktowymi istniejącymi w niedomieszkowanej warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n przylegającej do bariery $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As:Si}$.

W Tab. 3 porównano amplitudy pików w widmach DLTS dla poszczególnych pułapek T1a (205 meV), T1b (215 meV), T2 (370 meV), T3 (380 meV) i T4 (470 meV) wykrytych w warstwach falowodowych $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$.

Tabela 3. Porównanie amplitud pików w widmach DLTS dla pułapek wykrytych w warstwach falowodowych heterostruktur laserowych przed i po procesie starzenia.

Table 3. Comparison of DLTS peak heights for traps detected in the laser heterostructures before and after aging processes.

Próbka	$\Delta C/C_0 \times 10^{-3}$					Sumaryczna wartość dla wszystkich pułapek
	T1a	T1b	T2	T3	T4	
Fb11	7	12	8.5	41	21	89.5
Fb10d3 (1000 h)	6.2	5.7	18.5	47	26	103.4

Próbka	$\Delta C/C_0 \times 10^{-3}$					
	T1a	T1b	T2	T3	T4	Sumaryczna wartość dla wszystkich pułapek
Fb10e6 (1000 h)	11.3	11.6	18.1	49.8	29.6	120.4
Fb10e6 (1865 h)	15.6	12	18	45	25	115.6

Jak wskazują dane przedstawione w Tab. 3 dominującymi pułapkami w warstwie falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n laserów heterozłączowych $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ze studnią kwantową GaAsP są elektronowe pułapki T3 (380 meV). Pułapki te związane są z centrami defektowymi DX zlokalizowanymi w otoczeniu jednego atomu Al i dwóch atomów Ga.

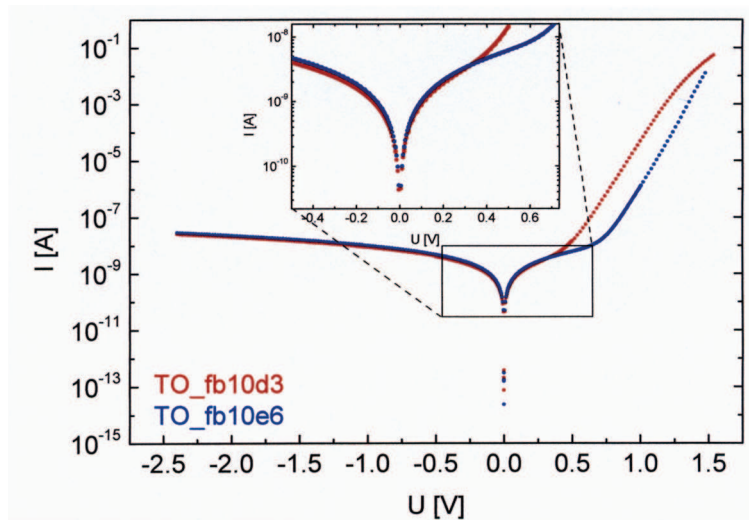
W laserach nie poddanych starzeniu koncentracja pułapek T3 (380 meV) jest dwukrotnie większa od koncentracji pułapek T4 (470 meV), pięciokrotnie większa od koncentracji pułapek T1a (205 meV) i T2 (370 meV) oraz ponad trzykrotnie większa od koncentracji pułapek T1b (215 meV). W wyniku procesu starzenia najsilniej (ponad dwukrotnie) wzrasta koncentracja pułapek T2 (370 meV). W przybliżeniu dwukrotny wzrost koncentracji obserwowany jest również w przypadku pułapki T1a (205 meV). Zachodzący wskutek starzenia przyrost koncentracji pułapek T3 (380 meV) zawiera się w przedziale 10-25 %, zaś przyrost koncentracji pułapek T4 (470 meV) wynosi od 25-50 %.

3. 2. CHARAKTERYSTYKA CENTRÓW DEFĘKTOWYCH W STUDNI KWANTOWEJ $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$

Badanie centrów defektowych przeprowadzono w laserze heterozłączowym $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ze studnią kwantową GaAsP , który podczas starzenia uległ degradacji katastroficznej (brak akcji laserowej) po ~ 1000 h (próbka fb10d3). Dla porównania przedstawiono również wyniki badań centrów defektowych w laserze, który poddany został starzeniu przez 1865 h (próbka fb10e6) i w wyniku tego procesu nastąpiło zwiększenie prądu progowego z ~ 160 mA do ~ 180 mA, zaś moc promieniowania zmniejszyła się z ~ 300 mW do 263 mW. Parametry centrów defektowych wyznaczano przy napięciu $U_R = 0$ V i amplitudzie impulsu zapełniającego $U_I = +1.5$ V. Na podstawie charakterystyk pojemnościowo-napięciowych ustalono, że szerokość warstwy ładunku przestrzennego przy napięciu $U_R = 0$ V wynosi ~ 34 nm, zaś przy napięciu $U_I = +1.5$ V jest równa ~ 13 nm. Zgodnie z układem warstw przedstawionym na Rys. 1, przy napięciu $U_R = 0$ V warstwa ładunku przestrzennego po stronie typu p wnika na głębokość 17 nm i obejmuje cały obszar studni kwantowej (15 nm)

oraz niewielką część warstwy falowodowej (2 nm). Po stronie typu n głębokość wnikania warstwy ładunku przestrzennego w obszar warstwy falowodowej wynosi 17 nm. Przy napięciu $U_j = +1.5$ V ładunek przestrzenny wnika na głębokość 6.5 nm w obszar studni kwantowej oraz na tę samą głębokość w obszar warstwy falowodowej typu n . Tak więc, w wyniku wstrzykiwania elektronów do studni kwantowej typu p centra defektowe wypełniane są w obszarze o szerokości 8.5 nm. Z drugiej strony w wyniku wstrzykiwania dziur do warstwy falowodowej $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ typu n centra defektowe wypełniane są w obszarze szerokości 10.5 nm. Uwzględniając jednak znacznie większą sprawność wstrzykiwania elektronów niż dziur [7,10] można przyjąć, że dominujący jest proces wypełniania pułapek elektronami w obszarze studni kwantowej typu p .

Rys. 7 ilustruje charakterystyki prądowo-napięciowe próbek fb10d3 i fb10e6. W kierunku zaporowym charakterystyki te różnią się nieznacznie, co wskazuje, że degradacja katastroficzna nie jest związana ze wzrostem prądu generacji w obszarze warstwy zaporowej lub wzrostem uptywności powierzchniowej [12]. Znaczne różnice pomiędzy charakterystykami obu próbek występują jednak w kierunku przewodzenia. W szczególności, w laserze, który uległ degradacji katastroficznej, w zakresie od 0.5 do 1.3 V widoczny jest silny (o ponad rząd wielkości) wzrost prądu rekombinacji w obszarze warstwy ładunku przestrzennego. Innymi słowy, znacznie

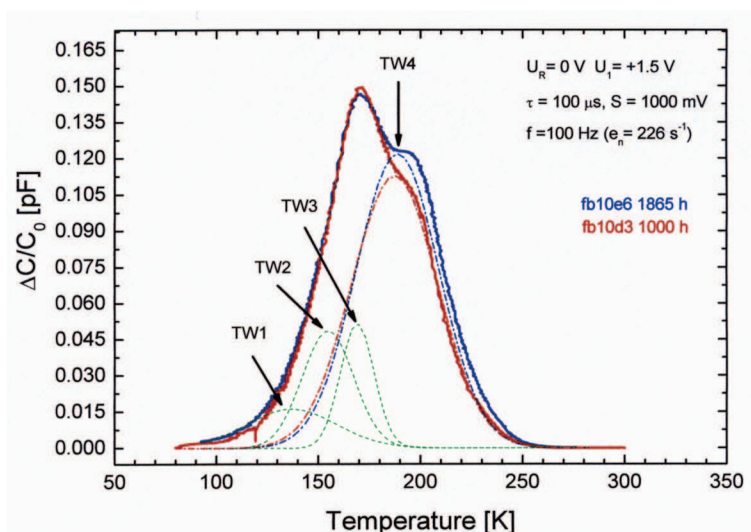


Rys. 7. Porównanie charakterystyk prądowo-napięciowych lasera, który uległ degradacji katastroficznej po starzeniu przez ~ 1000 h (próbka fb10d3) oraz lasera (próbka fb10e6), którego akcja laserowa nie została przerwana po starzeniu przez 1865 h.

Fig. 7. Current-voltage characteristics of a laser that underwent the catastrophic degradation after aging for ~ 1000 h (sample fb10d3) and that (sample fb10e6) whose laser action was not terminated after aging for 1865 h.

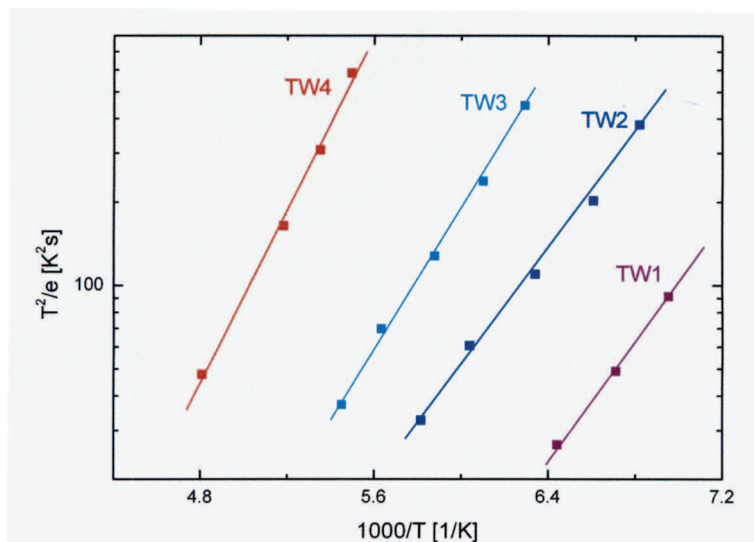
wzrosła gęstość prądu w zakresie napięć 0.5 - 1.3 V. Jednocześnie w zakresie napięć ~ 1.5 V charakterystyka prądowo-napięciowa zaczyna się zaginać wskutek wpływu oporności szeregowej.

Na Rys. 8 przedstawiono widma DLTS dla próbek fb10d3 i fb10e6. W wyniku aproksymacji widm DLTS sumą funkcji Gaussa wykryto 4 centra defektowe oznaczone jako TW1, TW2, TW3 i TW4. Zgodnie z warunkami eksperymentu można przyjąć, że centra te są pułapkami elektronowymi znajdującymi się w obszarze studni kwantowej $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$. Otrzymane wyniki wskazują, że czas starzenia nie wpływa na amplitudę pików odpowiadających pułapkom TW1, TW2 i TW3, natomiast powoduje wzrost amplitudy pików związanych z pułapkami TW4. Wynika stąd, że degradacja katastroficzna nie wydaje się być spowodowana przez wzrost koncentracji centrów



Rys. 8. Porównanie widm DLTS otrzymanych w wyniku wstrzykiwania nośników ładunku do studni kwantowej GaAsP dla laserów o różnym czasie starzenia. Zakres temperatur 80-300 K, okno szybkości emisji 226 s $^{-1}$. Próbkę fb10d3 uległa degradacji katastroficznej po czasie ~ 1000 h. Pułapki TW1, TW2, TW3 i TW4 zostały wykryte w wyniku aproksymacji widm sumą funkcji Gaussa. ΔC , C_0 i τ oznaczają odpowiednio przyrost pojemności warstwy ładunku przestrzennego wskutek zapełnienia pułapek nośnikami mniejszościowymi, pojemność tej warstwy w stanie ustalonym przy napięciu $U_R = 0$ V i czas trwania impulsu zapełniającego.

Fig. 8. Comparison of DLTS spectra obtained due to injecting charge carriers into the GaAsP quantum for lasers after different aging time. Temperature range 80-300 K, emission rate window 226 s $^{-1}$. The sample fb10d3 underwent the catastrophic degradation after ~ 1000 h. The traps TW1, TW2, TW3 and TW4 were revealed as a result of the experimental data approximation with the sum of Gaussian functions. ΔC and C_0 denote the change of the space charge layer capacitance due to filling the traps with the minority carriers and the capacitance under quiescent bias $U_R = 0$ V, and filling pulse duration time, respectively.



Rys. 9. Temperaturowe zależności szybkości emisji nośników ładunku dla centrów defektowych wykrytych w studni kwantowej GaAsP wybranych laserów heterozłączowych (próbki fb10d3 i fb10e6).

Fig. 9. Temperature dependences of charge carriers' emission rate for defect centres detected in GaAsP quantum well of selected heterostructure lasers (samples fb10d3 and fb10e6).

defektowych wykrytych w obszarze studni kwantowej $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$. Wykresy Arrheniusa dla pułapek wykrytych w tym obszarze przedstawiono na Rys. 9, zaś w Tab. 4 zestawiono wyznaczone na podstawie tych wykresów wartości parametrów pułapek. W Tab. 4 podano także średnią wartość temperatury T_m , określającej położenie danego piku w widmie DLTS dla okna szybkości emisji 226 s^{-1} .

Tabela 4. Zestawienie parametrów centrów defektowych wykrytych w wykrytych w studni kwantowej $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ w wyniku wstrzykiwania nośników ładunku.

Table 4. Summary of parameters of defect centres detected in the $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ quantum well due to injection of charge carriers.

Symbol pułapki	E_a [meV]	A [$\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$]	σ_n (cm^2)	T_m [K] dla $e_n=226 \text{ s}^{-1}$
TW1	205 ± 10	2×10^5	9×10^{-16}	137 ± 2
TW2	250 ± 15	2×10^5	9×10^{-16}	155 ± 2
TW3	200 ± 10	3×10^4	1×10^{-16}	170 ± 2
TW4	310 ± 20	7×10^5	3×10^{-15}	189 ± 2

Jak wynika z danych przedstawionych w Tab. 4 wykryte pułapki TW1, TW2, TW3 i TW4 charakteryzują się energią aktywacji równą odpowiednio 205, 250, 200 i 310 meV. W świetle danych literaturowych [13-15] można przyjąć, że pułapki TW1 (205 meV), TW2 (250 meV) i TW3 (200 meV) są centrami DX zlokalizowanymi w materiale studni kwantowej w otoczeniu o różnej konfiguracji atomów arsenu i fosforu, spowodowanej fluktuacjami składu warstwy $GaAs_{0.9}P_{0.1}$. Pułapki TW4 (310 meV) są prawdopodobnie związane z rodzimymi defektami punktowymi, które generowane są wskutek wspinania się dyslokacji nachylonych pochodzących od dyslokacji niedopasowania [12, 14-15].

4. PODSUMOWANIE

Metodę niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej (DLTS) zastosowano do badania centrów defektowych w laserach heterozłączowych AlGaAs/GaAs ze studnią kwantową GaAsP, emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda = 808$ nm. W warstwach falowodowych laserów wykryto 5 pułapek T1a, T1b, T2, T3 i T4 charakteryzujących się energią aktywacji odpowiednio 205, 215, 370, 380 i 470 meV. Stwierdzono, że pułapki T1a (205 meV), T2 (370 meV), T3 (380 meV) i T4 (470 meV) są pułapkami elektronowymi w niedomieszkowanej warstwie falowodowej $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ typu n . Ponadto, pułapki T2, T3 i T4 zidentyfikowane zostały jako centra DX zlokalizowane w otoczeniu o różnej konfiguracji atomowej spowodowanej fluktuacjami składu warstwy. Pułapki T3 (380 meV) są dominującymi pułapkami w warstwie falowodowej $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ typu n i są centrami DX zlokalizowanymi w otoczeniu jednego atomu Al i dwóch atomów Ga. W laserach nie poddanych starzeniu koncentracja tych pułapek jest dwukrotnie większa od koncentracji pułapek T4 (470 meV), pięciokrotnie większa od koncentracji pułapek T1a (205 meV) i T2 (370 meV) oraz ponad trzykrotnie większa od koncentracji pułapek T1b (215 meV). W wyniku procesu starzenia najsilniej (ponad dwukrotnie) wzrasta koncentracja pułapek T2 (370 meV). W przybliżeniu dwukrotny wzrost koncentracji obserwowany jest również w przypadku pułapki T1a (205 meV). W warstwie $GaAs_{0.9}P_{0.1}$ tworzącej studnię kwantową wykryto 3 pułapki elektronowe charakteryzujące się energią aktywacji równą odpowiednio 200, 205 i 250 meV, które przypisano centrom DX zlokalizowanym w otoczeniu o różnej konfiguracji atomów arsenu i fosforu, spowodowanej lokalnymi fluktuacjami koncentracji atomów tych pierwiastków. Ponadto, w warstwie tej wykryto pułapki elektronowe o energii aktywacji równej 310 meV, które są prawdopodobnie związane z rodzimymi defektami punktowymi generowanymi wskutek wspinania się dyslokacji nachylonych pochodzących od dyslokacji niedopasowania.

LITERATURA

- [1] Kozłowska A., Wawrzyniak P., Tomm J.W., Weik F., Elsaesser T.: Deep level emission from high-power diode laser bars detected by multispectral infrared imaging, *Appl. Phys. Lett.* 87, (2006) 153503
- [2] Kozłowska A., Wawrzyniak P., Maląg A., Teodorczyk M.: Reliability screening of diode lasers by multispectral infrared imaging, *J. Appl. Phys.* 99, (2006) 053101
- [3] Kaniewska M., Kryńska D., Wesołowski W.: DLTS study of deep levels in GRIN-SCH-SQW GaAs/AlGaAs laser diode structures grown by MBE, *Optic. Mat.* 17, (2001) 283
- [4] Kaniewska M.: Degradation study in SCH-SQW GaAs/AlGaAs lasers, *Mat. Sci. Eng.* B102, (2003), 327
- [5] Tomm J.W., Barwolff A., Jeager A., Bollmann J., Masselink T., Gerhard A., Donecker J., Deep level spectroscopy of high-power laser diode arrays, *J. Appl. Phys.* 84, (1998) 1325
- [6] Tang M., Shum K., Zeng L., Tamargo M.C., Dynamics of recombination-enhanced defect reaction in a ZnCdSe single quantum well, *Appl. Phys. Lett.* 73, (1998) 1541
- [7] Bhattacharya P.: The relationship of the D-X centre in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and other III-V alloys with the conduction band structure, *Semicond. Sci. Technol.*, 3, (1988) 1145
- [8] As D.J., Epperlein P.W., Mooney P.M.: Deep electron traps in GaAs/n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ single-quantum wells, *J. Appl. Phys.* 64, (1988), 2408
- [9] Reemtsma F.-H., Kugler S., Heime K., Schlapp W., Weimann G.: Deep levels in p-type AlGaAs/GaAs heterostructures, *J. Appl. Phys.* 65, (1989) 2867
- [10] Haddab Y., Py M.A., Buhlmann H.-J., Ilegems M.: Investigation on DX centres in modulation-doped field-effect transistor-type $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures using a Fourier-transform deep level transient spectroscopy system, *J. Electr. Mat.* 23, (1994) 1343
- [11] Takikawa M., Ozeki M.: Alloy fluctuation effect on electrical transition properties of DX centre observed with modified deep level transient spectroscopy, *Jap. J. App. Phys.* 24, (1985) 303
- [12] Ott M: Capabilities and reliability of LEDs and laser diodes, NASA Goddard Space Flight Center, melanie.ott@gsfc.nasa.gov.
- [13] Criado J., Gomez A., Munoz E., Calleja E. : Deep level transient spectroscopy analysis of DX centers in AlGaAs and GaAsP, *Appl. Phys. Lett.* 49, (1986) 1790
- [14] Kamiński P.: Grown-in deep-level defects in vapour phase epitaxial $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, *Electron Technol.* 25, 3 (1992)
- [15] Kamiński P.: Application of deep-level transient spectroscopy for monitoring point defects in II-V semiconductors, *Mat. Sci. Eng.* B20, 221 (1993)

INVESTIGATION OF DEFECT CENTRES IN LASER HETERO-STRUCTURES OF AlGaAs/GaAs WITH GaAsP QUANTUM WELL

SUMMARY

Deep level transient spectroscopy (DLTS) has been applied to investigation of defect centres in heterostructures of AlGaAs/GaAs with GaAsP quantum well used for production of high-power laser diodes emitting the beam with the wavelength of 808 nm. In undoped $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ cladding layers, five traps T1a (205 meV), T1b (215 meV), T2 (370 meV), T3 (380 meV) and T4 (470 meV) were revealed. The traps T1a, T2, T3 and T4 were found to be electron traps located in the cladding layer of *n*-type. The latter three traps are related to *DX* centres surrounded by different atomic composition due to alloy fluctuation effect. The traps T3 (380 meV), identified as *DX* centres localized in the vicinity of one Al atom and two Ga atoms, are predominant and their concentration is two times higher than that of traps T4 (470 meV), five times higher than the concentrations of traps T1a (205 meV) and T2 (370 meV) and three times higher than the concentration of traps T1b (215 meV). As a result of the aging processes, a strong increase (more than twofold) in the concentration of traps T2 (370 meV) was observed. The concentration of trap T1a (205 meV) was also approximately doubled. In the quantum well layer of $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$, three electron traps with activation energies of 200, 205 and 250 were revealed. These traps are likely to be related to *DX* centres surrounded by different quantity of arsenic and phosphorus atoms due to alloy fluctuation effect. Moreover, a trap with the activation energy of 310 meV was detected. This trap is presumably related to a native defect resulting from climbing of inclined dislocations originated from the misfit dislocations.