

## Comparison of selected properties of light-emitting diodes

### Porównanie wybranych właściwości diod elektroluminescencyjnych

#### Streszczenie

W ramach pracy przeanalizowano wybrane właściwości niebieskich diod elektroluminescencyjnych w celu doboru odpowiednich parametrów umożliwiających wykorzystanie badanych diod do kalibracji detektora promieniowania Czerenkowa. W szczególności eksperymentalnie przebadano 10 modeli diod LED mierząc czas narastania, szerokość impulsu, impedancję zastępczą oraz moc optyczną.

Pomiary elektrycznych właściwości diod zostały wykonane przy użyciu analizatora impedancji oraz kąta przesunięcia fazowego. Na podstawie uzyskanych rezultatów możliwe było wyznaczenie rezystancji oraz pojemności diod przy różnych wartościach napięcia.

Charakterystyki czasowe wyznaczono przy użyciu oscyloskopu LeCroyWaverunner 62Xi, generatora funkcyjnego DDS oraz fotopowielacza. Pomiary wykonano dla różnych wartości napięcia oraz przy wykorzystaniu kilku filtrów ograniczających natężenie światła docierającego do fotopowielacza. W każdym rozpatrywanym przypadku badane były 2 różne diody tego samego typu, co pozwoliło na określenie różnic między poszczególnymi egzemplarzami.

W ramach badań właściwości optycznych wyznaczono moc optyczną diod. Następnie wykorzystując uzyskane rezultaty obliczono liczbę fotonów przypadających na pojedynczy impuls. Do pomiarów wykorzystano miernik Newport 1835-C wyposażony w detektor 818-UV/CM.

Wykonane badania miały na celu wyselekcjonowanie diod LED o odpowiednich parametrach czasowych, elektrycznych i optycznych, które najlepiej sprawdzą się podczas kalibracji

#### Abstract

In the paper some selected properties of the blue light-emitting diodes planned to be used to calibration of Cherenkov radiation's detector have been analysed. In particular ten LEDs models have been experimentally examined by measuring the rise time, pulse width, complex impedance and optical power.

Measurements of LEDs electric properties have been made by using impedance and phase analyser. On the basis of obtained results the resistance and capacitance of each LED for different voltage values have been calculated.

Timing characteristics were determined by using LeCroyWaverunner 62Xi oscilloscope, DDS function generator and photomultiplier. Measurements have been performed for different values of voltage and a few neutral density filters to restrict the intensity of light reaching the photomultiplier have been used. In each case two different diodes of the same type have been tested to define differences between copies.

Research of optical properties consisted of measuring optical power of LEDs. Then, using the obtained results, number of photons per pulse has been calculated. To measurement a Newport 1835-C optical power measurer fitted with a 818-UV/CM detector has been used.

Research has been performed to select the diode with relevant parameters, which best suits during calibration of Cherenkov radiation's detector. In the next step testing properties of LEDs in various connections is planned.

**Keywords:** light-emitting diode, rise time, pulse width, optical power, electric properties

<sup>1</sup>izabelawrona2107@op.pl, Instytut Fizyki, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska, www.pcz.pl

<sup>2</sup>jarosikmw@wip.pcz.pl, Instytut Fizyki, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska, www.pcz.pl

detektora promieniowania Czerenkowa. W kolejnym kroku planowane są badania polegające m.in. na testowaniu właściwości układów diod w różnych połączeniach.

**Słowa kluczowe:** dioda elektroluminescencyjna, czas narastania, szerokość impulsu, moc optyczna, właściwości elektryczne

## 1. Wprowadzenie

W ramach pracy przeanalizowano wybrane właściwości niebieskich diod elektroluminescencyjnych w celu doboru odpowiednich parametrów umożliwiających wykorzystanie badanych diod do kalibracji detektora promieniowania Czerenkowa. Promieniowanie Czerenkowa jest promieniowaniem elektromagnetycznym emitowanym podczas ruchu naładowanej cząstki z prędkością większą od prędkości światła w danym ośrodku. Dzięki analizie promieniowania Czerenkowa możliwe jest wykrycie i poznanie właściwości neutron pochodzenia kosmicznego [1, 2].

Elementem bezpośrednio odpowiadającym za detekcję promieniowania jest fotopowielacz. Właściwa kalibracja wodnego detektora wyposażonego w dziesiątki tysięcy fotopowielaczy może być przeprowadzona przy użyciu diod elektroluminescencyjnych o dobrze określonych parametrach. Ze względu na fakt, iż długość fal promieniowania Czerenkowa pokrywa się z widmem światła widzialnego o najkrótszych falach, do kalibracji najlepiej zastosować diody dające światło niebieskie [3, 4].

Celem pracy jest zaprezentowanie wyników przeprowadzonych testów z uwzględnieniem podziału na właściwości elektryczne, czasowe i optyczne.

## 2. Materiały

Do testów wybrano diody pięciu różnych producentów, przy czym konkretne modele dobierano tak, by długości fali emitowanego promieniowania były zbliżone. Zauważmy, że rozbieżności długości fali pomiędzy poszczególnymi typami diod nie przekraczają 22 nm. Ponadto w badaniach wykorzystano diody powierzchniowe oraz tradycyjne. Modele diod opisywanych w ramach pracy zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Rozpatrywane modele diod

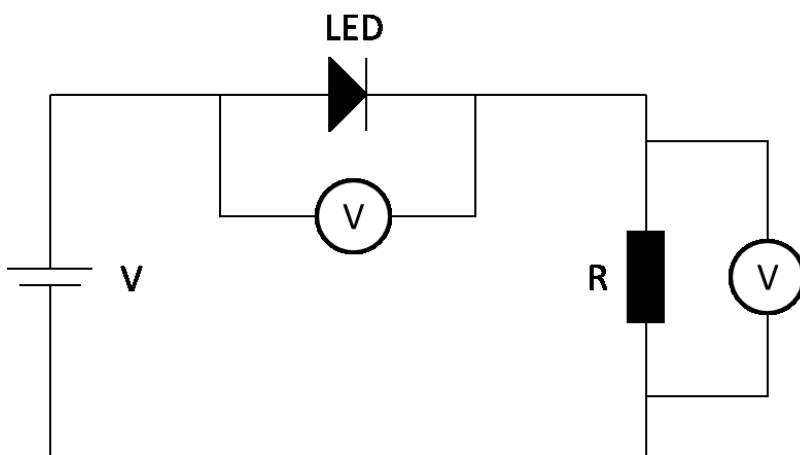
Symbol	Producent	Oznaczenie producenta	Długość fali [nm]	Format
D1	MULTICOMP	MCL053SBLC	472	5 mm
D2	AVAGO TECHNOLOGIES	HLMP-CB1A-XY0DD	470	5 mm
D3	KINGBRIGHT	L-7113QBC-G	465	5 mm
D4	KINGBRIGHT	L-10934VBC/DS-D	470	3 mm
D5	KINGBRIGHT	L-17114VBC/DS-D	470	5 mm
D6	KINGBRIGHT	KA-3535QB25Z4S	450	Dioda powierzchniowa
D7	AVAGO TECHNOLOGIES	HLMP-CB1A-UV0DD	470	5 mm
D8	MULTICOMP	703-0147	465	Dioda powierzchniowa
D9	OSRAM	LBH9GP-GYHY-35-1	470	Dioda powierzchniowa
D10	LUMILEDS	LXML-PB01-0023	470	Dioda powierzchniowa

Źródło: Opracowanie własne

### 3. Właściwości elektryczne – metoda pomiarów

Rzeczywista dioda elektroluminescencyjna charakteryzuje się występowaniem rezystancji szeregowej ( $R_s$ ), rezystancji upływu ( $R_u$ ) oraz pojemności ( $C$ ), związanej z ładunkiem przestrzennym na złączu p-n. Rezystancja upływu wynika ze zjawisk powierzchniowych i defektów struktury złącza, natomiast rezystancja szeregową jest sumą rezystancji obszarów p, n oraz doprowadzeń [5].

Rezystancja szeregową diod opisywanych w pracy została wyznaczona przy wykorzystaniu obwodu elektrycznego przedstawionego na rysunku 1.



Rysunek 1. Obwód do wyznaczenia rezystancji szeregowej diody [opracowanie własne]

Rezystancja opornika  $R$ , którym posłużono się podczas pomiarów wynosiła  $18 \Omega$ . Dzięki zmierzeniu wartości napięcia na wspomnianym rezystorze możliwe było obliczenie natężenia prądu płynącego w obwodzie, a następnie, na jego podstawie, wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych badanych diod [6].

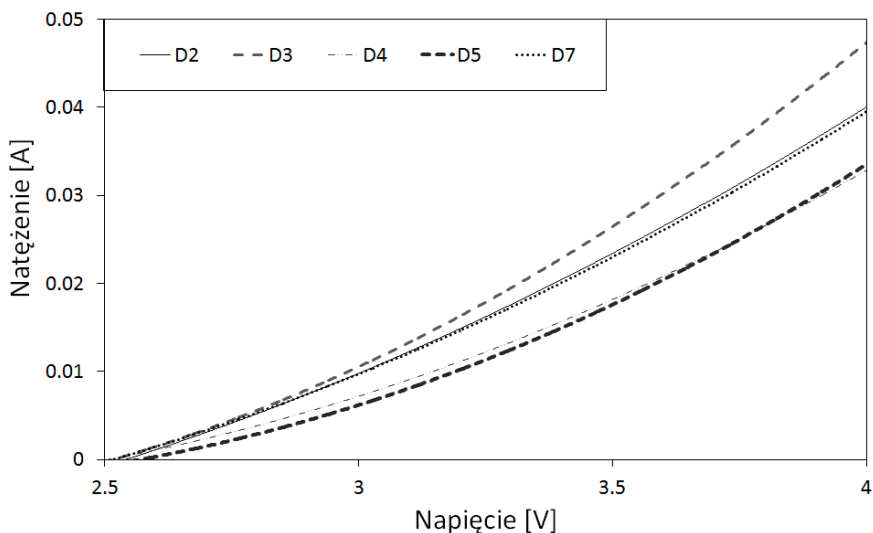
Pomiary modułu impedancji i kąta przesunięcia fazowego wykonane przy użyciu miernika 4284A HP Precision LCR Meter posłużyły do obliczenia rezystancji upływu oraz pojemności 10 modeli diod.

### 3.1. Rezultaty pomiarów właściwości elektrycznych

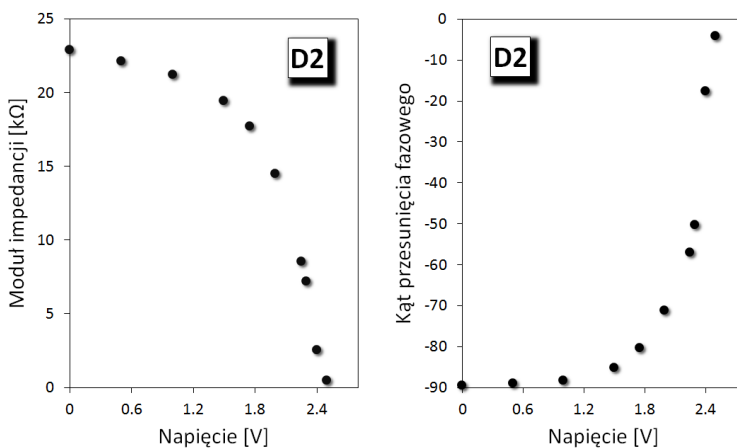
Charakterystyki prądowo napięciowe diod były bardzo zbliżone dla wszystkich modeli. Przykładowe wyniki pomiarów zostały zaprezentowane na wykresie 1.

Rezystancję szeregową obliczono jako tangens kąta nachylenia wykresu do osi odciętych [7]. W omawianym przypadku można przyjąć, że jest ona taka sama dla wszystkich typów diod i wynosi  $33 \Omega$ .

Przykładowe wyniki pomiarów dokonanych przy użyciu analizatora impedancji przedstawiono na wykresie 2.



Wykres 1. Natężenie w funkcji napięcia dla 5 modeli diod [opracowanie własne]



Wykres 2. Moduł impedancji i kąt przesunięcia fazowego diody D2 w funkcji napięcia [opracowanie własne]

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem napięcia moduł impedancji oraz kąt przesunięcia fazowego dążą do zera. Dzieje się tak w przypadku wszystkich modeli badanych diod. Ujemny kąt przesunięcia fazowego świadczy o pojemnościowym charakterze impedancji. Analizując uzyskane wykresy można określić przy jakim napięciu dioda zaczyna świecić – pojawia się nagły spadek impedancji [8].

Impedancja zastępcza diody rzeczywistej wyraża się wzorem (1):

$$Z = R_s + \frac{R_u}{1 + (R_u \omega C)^2} - i \frac{R_u^2 \omega C}{1 + (R_u \omega C)^2}, \quad (1)$$

gdzie:  $R_s$  – rezystancja szeregową (33  $\Omega$ ),  $R_u$  – rezystancja upływu,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – częstotliwość (1 MHz),  $C$  – pojemność diody.

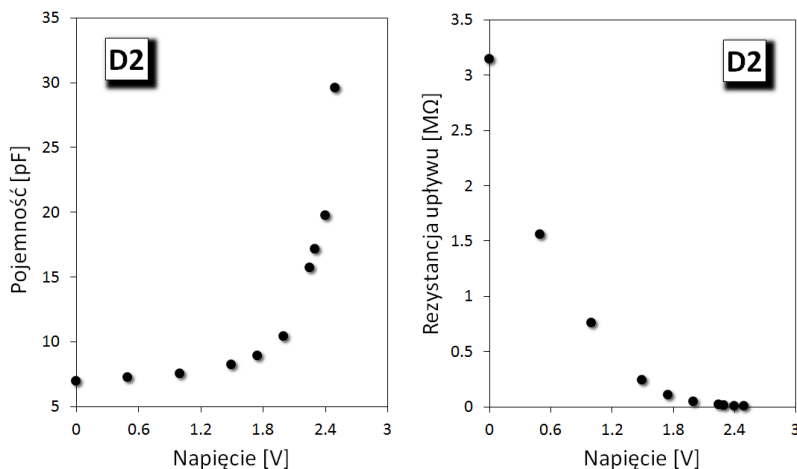
Zmierzone wartości modułu impedancji (2) oraz kąta przesunięcia fazowego (3) wyrażają się wzorami:

$$|Z| = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{x}{y}\right), \quad (3)$$

gdzie:  $x$  – część urojona wzoru (1),  $y$  – część rzeczywista wzoru (1).

Stosując powyższe równania obliczono wartości rezystancji upływu i pojemności diod przy różnych napięciach. Przykładowe wyniki obliczeń pokazano na wykresie 3.



Wykres 3. Pojemność i rezystancja upływu diody D2 w funkcji napięcia [opracowanie własne]

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że pojemność rośnie wraz z napięciem, natomiast rezystancja upływu maleje. Zależność ta powtarza się we wszystkich modelach testowanych diod.

Rezystancja upływu, która dla najmniejszych wartości napięcia przyjmuje wartości rzędu megaomów, odgrywa rolę podczas pracy diody w kierunku zaporowym. Otrzymane wartości pojemności całkowitej stanowią sumę pojemności dyfuzyjnej oraz złączowej, które są nieliniowymi funk-

cyjami doprowadzonego napięcia. Pojemność złączowa wynika z występowania ładunku przestrzennego w warstwie zubożonej i jest istotna przy polaryzacji w kierunku zaporowym, natomiast pojemność dyfuzyjna, która dominuje podczas polaryzacji w kierunku przewodzenia, ma związek z nadmiarowymi nośnikami dyfundującymi w głąb obszarów p i n [5].

Wyniki uzyskane dla wszystkich typów diod zostały zestawione w tabeli 2. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż diody powierzchniowe wyróżniają się mniejszą rezystancją upływu od diod tradycyjnych, z kolei ich pojemność jest znacznie większa.

Tabela 2. Zestawienie otrzymanych rezultatów

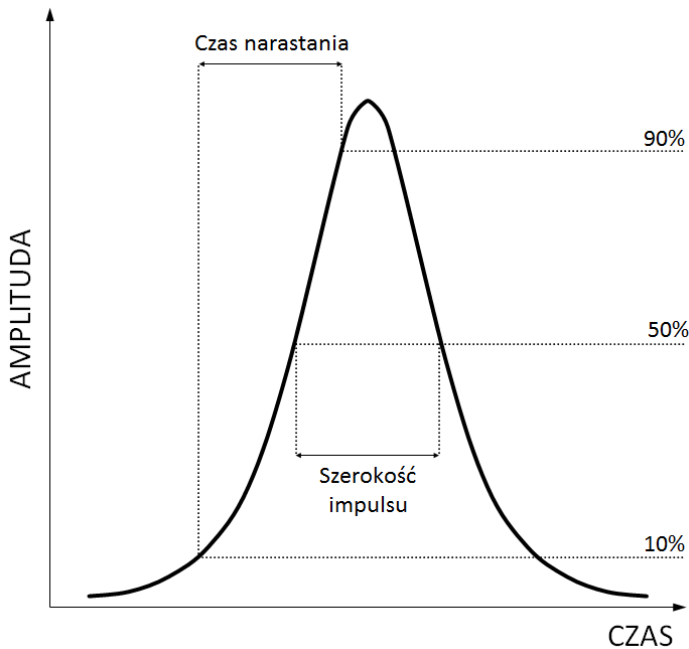
Model diody	Format	Maksymalna pojemność [pF]	Maksymalna rezystancja upływu [MΩ]
D1	5 mm	55,25	51,11
D2	5 mm	43,17	3,14
D3	5 mm	80,41	2,57
D4	3 mm	37,62	11,04
D5	5 mm	9,02	6,55
D6	Dioda powierzchniowa	354,07	0,59
D7	5 mm	44,28	1,74
D8	Dioda powierzchniowa	685,82	0,031
D9	Dioda powierzchniowa	1113,78	0,40
D10	Dioda powierzchniowa	6411,06	0,013

Źródło: Opracowanie własne

#### 4. Charakterystyki czasowe – metoda pomiarów

Układ, przy użyciu którego wyznaczono charakterystyki czasowe 7 modeli diod elektroluminescencyjnych (D1-D7), wyposażony był w oscyloskop LeCroyWaverunner 62Xi umożliwiający pomiar parametrów przebiegów odkształconych. Aby zastosować wspomniany oscyloskop konieczne było przekształcenie światła wytwarzanego przez badaną diodę na impuls elektryczny. W tym celu posłużono się fotopowielaczem [9]. Fotony padające na fotokatodę tego urządzenia wybijają z jej powierzchni elektrony wskutek zewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego. W kolejnym etapie następuje emisja wtórna elektronów z powierzchni układu dynod, dzięki czemu impuls zostaje znacznie wzmacniony [3].

Układ, przez cały czas trwania pomiarów, musiał być izolowany od zewnętrznych źródeł światła, aby zapobiec uszkodzeniu fotopowielacza oraz zapewnić wiarygodne wyniki. Każda z prezentowanych wartości czasu narastania i szerokości impulsu stanowi średnią arytmetyczną ok. 100 pomiarów [9].



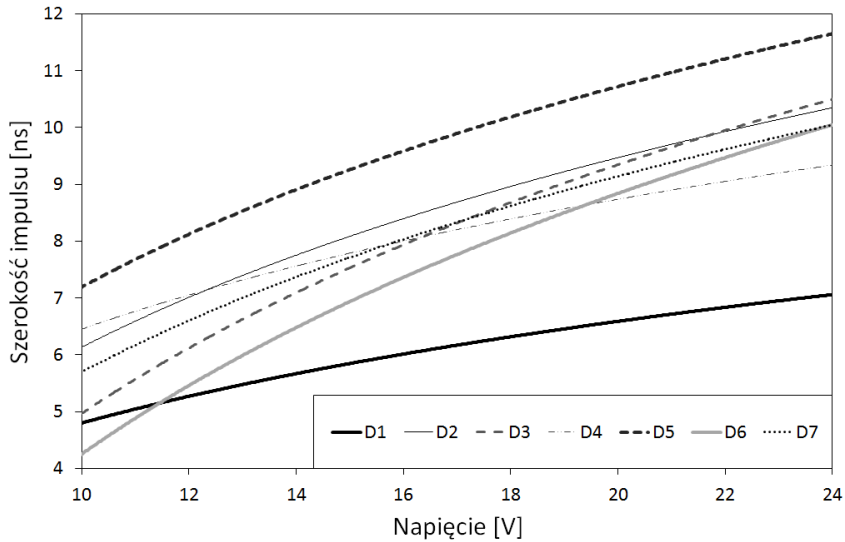
Rysunek 2. Czas narastania i szerokość impulsu [opracowanie własne]



## 4.1. Szerokość impulsu

### 4.1.1. Porównanie szerokości impulsu różnych modeli diod

Szerokość impulsu 7 modeli diod została zmierzona dla różnych wartości napięcia. Pomiary wykonano przy użyciu filtrów ND (NeutralDensity), które pozwalają na ograniczenie natężenia padającego światła, jednak nie zmieniają przy tym jego częstotliwości [10]. Uzyskane rezultaty zostały pokazane na wykresie 4.

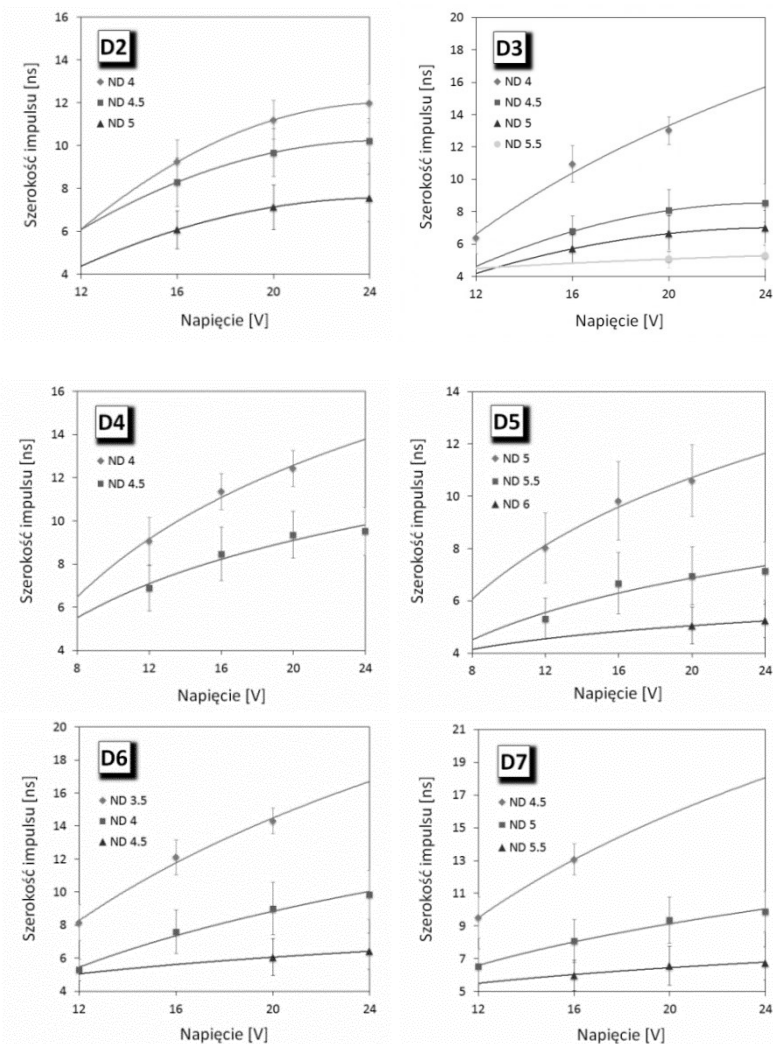


Wykres 4. Szerokość impulsu w funkcji napięcia [opracowanie własne]

Wzrostowi napięcia towarzyszy wzrost szerokości impulsu, co można zauważyć na wykresie 4. Na podstawie uzyskanych wyników łatwo stwierdzić, że najmniejszą szerokością impulsu cechuje się dioda D1, co szczególnie widoczne staje się przy wyższych wartościach napięcia. Dodatkowo w przypadku tego modelu diody wzrost szerokości impulsu wraz z napięciem jest najwolniejszy. Dioda D5 przy każdym z zastosowanych napięć posiada największą szerokość impulsu spośród badanych. Na uwagę zasługuje również dioda D6, która dla niskich wartości napięcia charakteryzuje się najmniejszą szerokością impulsu, która jednak szybko rośnie wraz ze wzrostem napięcia.

#### 4.1.2. Szerokość impulsu dla różnych filtrów ND

Pomiary szerokości impulsu zostały przeprowadzone dla filtrów ND o różnej mocy tłumienia. Ze względu na ograniczoną czułość fotopowielacza niemożliwe było zastosowanie zbyt silnych filtrów, z kolei przy filtrach o niewielkim stopniu tłumienia pojawiały się efekty saturacji. Najsilniejszym filtrem wykorzystanym podczas pomiarów był filtr ND6 (przepuszczający 16,67% światła), natomiast najsłabszym filtr ND3.5 (przepuszczający 28,6% światła) [10].

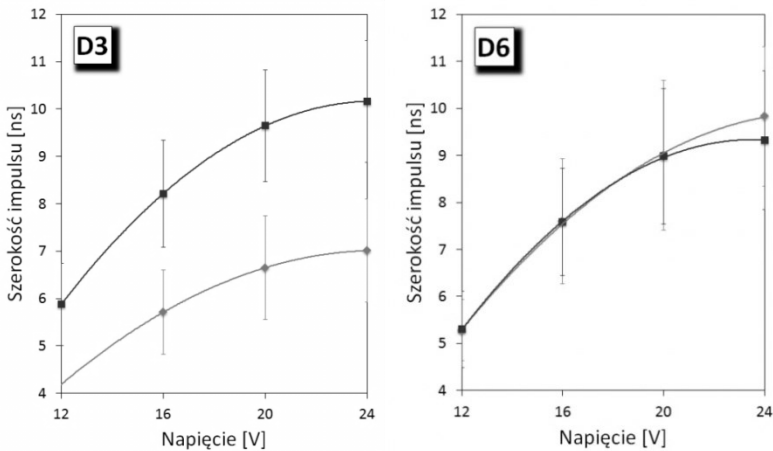


Wykres 5. Porównanie szerokości impulsu przy zastosowaniu filtrów ND o różnej mocy tłumienia [opracowanie własne]

Na wykresie 5 pokazano uzyskane rezultaty. Łatwo zauważyć, iż moc zastosowanego filtra ma duży wpływ na szerokość impulsu. Dla wszystkich modeli testowanych diod spełniona jest zależność, że im większy współczynnik tłumienia tym szerokość impulsu staje się mniejsza. W przypadku diody D1 dokonanie pomiaru było możliwe przy użyciu tylko jednego filtra.

#### 4.1.3. Test jakości

W każdym rozpatrywanym przypadku badane były 2 różne diody tego samego typu, co pozwoliło na określenie różnic między poszczególnymi egzemplarzami. Dla wszystkich typów diod, z wyjątkiem D3, różnice między uzyskanymi rezultatami mieściły się w granicach niedokładności pomiarowej, co zostało pokazane na wykresie 6.

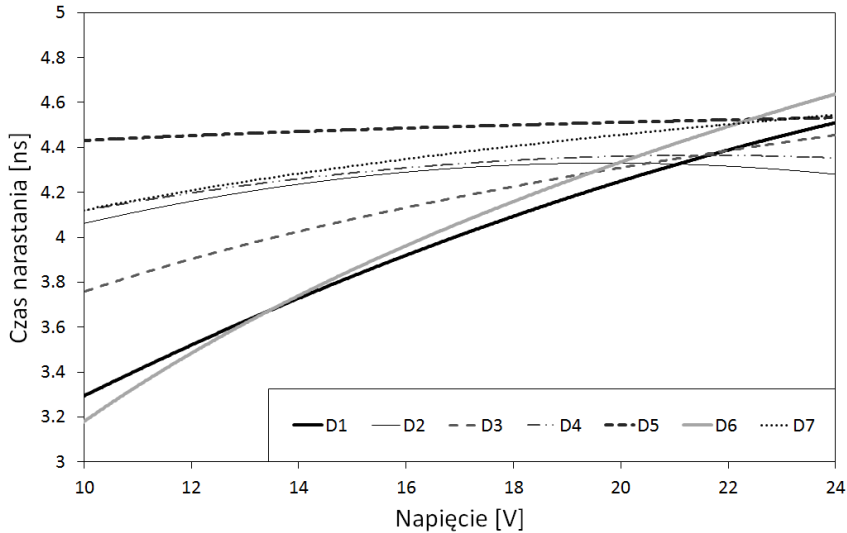


Wykres 6. Szerokość impulsu w funkcji napięcia dla dwóch egzemplarzy diody D3 oraz dwóch D6 [opracowanie własne]

## 4.2. Czas narastania

### 4.2.1. Porównanie czasu narastania dla różnych modeli diod

Czas narastania zmierzony przy różnych napięciach został zobrazowany na wykresie 7.

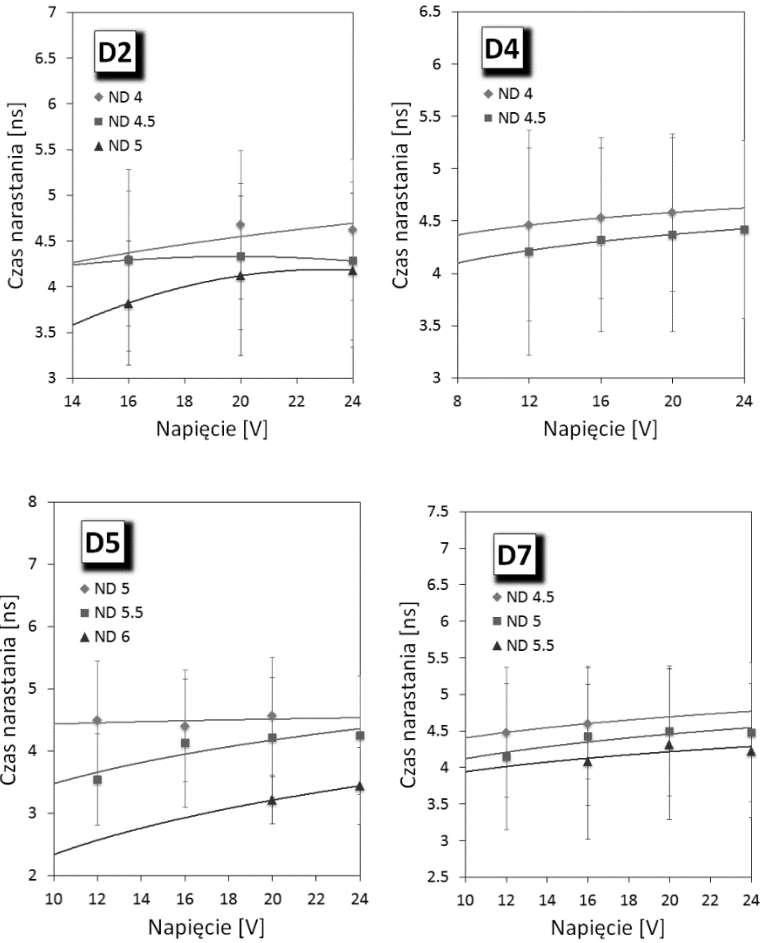


Wykres 7. Czas narastania w funkcji napięcia [opracowanie własne]

Na podstawie otrzymanych wyników można zaobserwować, że czas narastania rośnie wraz z napięciem. Przy niskich wartościach napięcia czas narastania znacznie się różni dla poszczególnych modeli testowanych diod, natomiast przy wyższych staje się zbliżony. Porównując wyniki z wykresów 4 oraz 7 można wywnioskować, że większej szerokości impulsu towarzyszy dłuższy czas narastania. Dioda D5 charakteryzuje się najwolniejszym, a D6 najszybszym wzrostem czasu narastania wraz z napięciem.

### 4.2.2. Czas narastania dla różnych filtrów ND

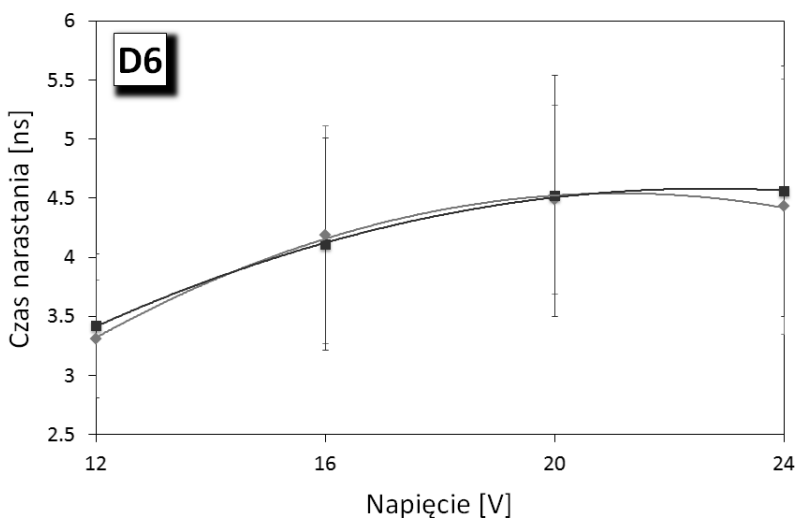
Pomiary wykonane przy użyciu filtrów ND o różnej mocy tłumienia pozwoliły stwierdzić, że czas narastania jest tym większy im słabszy filtr zostanie zastosowany. Przykładowe wyniki zostały pokazane na wykresie 8.



Wykres 8. Porównanie czasu narastania przy zastosowaniu filtrów ND o różnej mocy tłumienia [opracowanie własne]

### 4.2.3. Test jakości

Podobnie jak w przypadku szerokości impulsu, czas narastania został zmierzony dla 2 diod każdego modelu. Po przeprowadzeniu analizy otrzymanych rezultatów nie stwierdzono istotnych rozbieżności. Przykładowe wyniki zaprezentowano na wykresie 9.



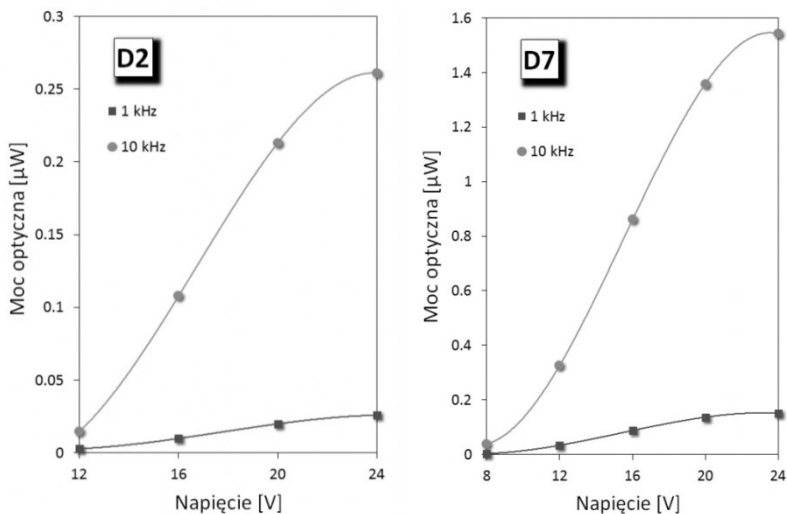
Wykres 9. Czas narastania w funkcji napięcia dla dwóch egzemplarzy diody D6 [opracowanie własne]

## 5. Właściwości optyczne – metoda pomiarów

W ramach badań właściwości optycznych przetestowano 7 modeli diod (D1-D7), przy użyciu miernika mocy optycznej Newport 1835-C wyposażonego w detektor 818-UV/CM. Pomiarów dokonano przy prądzie stałym, włączonym filtrze dolno- i górnoprzepustowym. Testy zostały wykonane dla dwóch częstotliwości impulsów przy kilku wartościach napięcia. Miernik mocy optycznej Newport 1835-C pozwolił na dostosowanie parametrów pomiarowych do długości fali światła, której wartość jest charakterystyczna dla każdego modelu diody, co zostało przedstawione w tabeli 1 [6, 7].

### 5.1. Rezultaty pomiarów właściwości optycznych

Wykorzystując opisaną metodę pomiarów uzyskano wartości mocy optycznej 7 modeli diod. Częstotliwość impulsów wynosiła 1 kHz oraz 10 kHz. Uzyskane wyniki dla diod o najmniejszej i największej mocy optycznej zostały przedstawione na wykresie 10.



Wykres 10. Moc optyczna w funkcji napięcia [opracowanie własne]

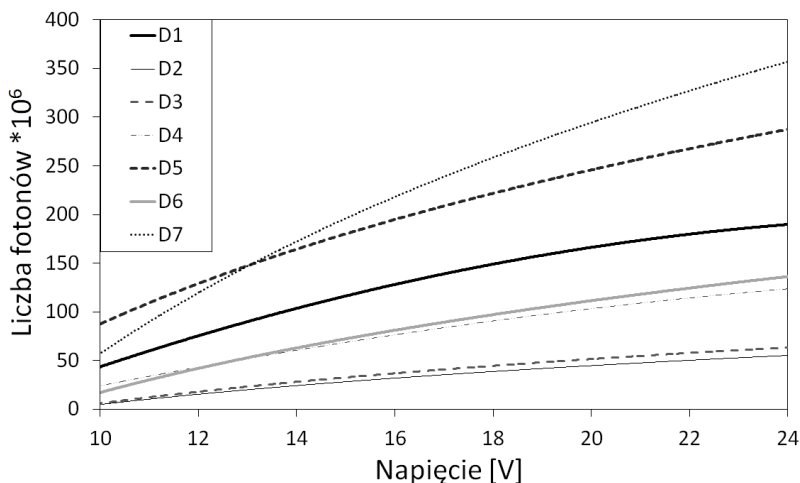
Analizując uzyskane rezultaty można stwierdzić, że wraz z napięciem rośnie również moc optyczna diody. Warto podkreślić, że w przypadku diody D2, której wyniki zostały przedstawione na wykresie, możliwe było zmierzenie mocy optycznej dopiero dla przyłożonego napięcia o wartości 12 V, ponieważ niższe napięcie nie powodowało świecenia diody (tak samo wyglądała sytuacja dla diod D3 i D6). Stwierdzono, że przy częstotliwości impulsów 1 kHz moc optyczna osiąga wartości poniżej 0,16  $\mu\text{W}$ , natomiast przy częstotliwości 10 kHz 1,6  $\mu\text{W}$ . Wartości te różnią się dla poszczególnych modeli diod. Jak wynika z przeprowadzonej analizy zwiększenie częstotliwości impulsów o rząd wielkości powoduje proporcjonalny wzrost mocy optycznej.

Uzyskane wyniki pozwoliły na obliczenie liczby fotonów przypadających na pojedynczy impuls. Do obliczeń posłużono się następującym wzorem (4):

$$n = \frac{P\lambda}{fhc}, \quad (4)$$

gdzie:  $P$  – moc optyczna,  $\lambda$  – długość fali światła charakterystyczna dla danej diody,  $f$  – częstotliwość pulsowania,  $h$  – stała Plancka,  $c$  – prędkość światła.

Uzyskane rezultaty zostały zaprezentowane na wykresie 11.



Wykres 11. Liczba fotonów dla pojedynczego impulsu w funkcji napięcia [opracowanie własne]

Na wykresie 11 przedstawiono liczbę fotonów dla pojedynczego impulsu w funkcji napięcia. Analizując wyniki można zaobserwować, że wraz z napięciem liczba fotonów szybko wzrasta. Dla niskich wartości napięcia różnice między poszczególnymi modelami badanych diod są stosunkowo niewielkie, jednak zwiększają się wraz ze wzrostem napięcia. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że liczba fotonów w jednym impulsie waha się od kilkudziesięciu do kilkuset milionów, w zależności od napięcia, przy czym największa jest dla diod D5 i D7, a najmniejsza dla diod D2 oraz D3. Warto podkreślić, że liczba fotonów jest taka sama, bez względu na zastosowaną częstotliwość impulsów.

## 6. Podsumowanie

Celem badań diod elektroluminescencyjnych było poznanie ich właściwości w celu wyselekcjonowania modeli o odpowiednich parametrach umożliwiających ich zastosowanie w procesie kalibracji detektora promieniowania Czerenkowa. W ramach pracy zostały przeprowadzone pomiary właściwości elektrycznych, czasowych oraz optycznych.

Podczas badań właściwości elektrycznych wyznaczono pojemność oraz rezystancję diod na podstawie zmierzonego modułu impedancji i kąta przesunięcia fazowego. Odnotowano znaczny wpływ przyłożonego napięcia na wspomniane parametry. Stwierdzono, że diody powierzchniowe cechują się jednocześnie najmniejszą rezystancją upływu i największą pojemnością.

Najważniejszymi parametrami decydującymi o przydatności danego modelu diody do kalibracji detektora są szerokość impulsu oraz czas narastania, których wartości powinny być jak najmniejsze. Wówczas impuls jest krótki,



szybko osiąga maksimum, dzięki czemu można osiągnąć dużą precyzję podczas kalibracji. Uzyskane rezultaty pozwoliły stwierdzić, że najodpowiedniejszymi charakterystykami czasowymi dla niskich napięć cechują się diody D1 i D6, jednak w obu przypadkach czas narastania gwałtownie rośnie wraz z napięciem w porównaniu z innymi modelami diod. Wykonane testy pokazały, że istotnym czynnikiem mającym wpływ zarówno na czas narastania jak i szerokość impulsu są filtry ND zastosowane podczas pomiarów. Dzięki ich wykorzystaniu można odpowiednio zmniejszyć parametry czasowe, przy czym na uwagę zasługuje fakt, iż moc tłumienia użytego filtra jest ograniczona czułością fotopowielacza. Nie zaobserwowano korelacji między długością światła charakteryzującą dany model diody ani ilością fotonów przypadających na jeden impuls a właściwościami czasowymi.

Analizując uzyskane rezultaty można wysunąć wniosek, że diody o większej pojemności odznaczają się korzystniejszymi charakterystykami czasowymi, jednak diody powierzchniowe, które wyróżniają się największą pojemnością, nie wytwarzały światła w obwodzie wykorzystanym do badania charakterystyk czasowych. Ponadto sprawiają spore trudności w odpowiednim podłączeniu do obwodu ze względu na niewielką trwałość.

W kolejnym kroku planowane są badania polegające m.in. na testowaniu właściwości układów diod w różnych połączeniach.

## Literatura

1. Strzałkowski A. *Fizyka jądra atomowego*, PWN, Warszawa 1978
2. Ginter J. *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, PWN, Warszawa 1979
3. Eisberg R., Resnick R. *Fizyka kwantowa atomów, cząsteczek ciał stałych, jąder i cząstek elementarnych*, PWN, Warszawa 1983
4. Goldański W. I., Kucenko A. W., Podgorecki M. I. *Statystyka pomiarów przy rejestracji promieniowania jądrowego*, PWN, Warszawa 1963
5. Van Zeghbroeck B. *Principles of Semiconductor Devices and Heterojunctions*, Prentice Hall PTR, 2007
6. Syrzycki A. *Laboratorium elektrotechniki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999
7. Koziej E., Sochoń B. *Elektrotechnika i elektronika*, PWN, Warszawa 1979
8. Watson J. *Elektronika*, WŁK Warszawa 1999
9. Tłaczała W., Tykarski L. *Elektronika w eksperymencie fizycznym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998
10. Gniadek K. *Optyczne przetwarzanie informacji*, PWN, Warszawa 1992