

Prof. dr hab. inż. Marek Tłaczała  
emerytowany profesor Politechniki Wrocławskiej

Wrocław, 7.04.2026

## Recenzja

DZIENIENAT WYDZIAŁU  
ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI  
WPLYNEŁO  
Dnia: 09.04.2026 r  
Podpis: J. P.

osiągnięć naukowych i aktywności naukowej dr inż. Łukasza Ciury związana z postępowaniem habilitacyjnym w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne na podstawie opisu osiągnięcia naukowego w postaci cyklu tematycznie powiązanych dziewięciu publikacji dotyczących teoretycznych i eksperymentalnych badań szumów małej częstotliwości w przyrządach i materiałach wykorzystywanych w detekcji podczerwieni.

### 1. Podstawowe informacje o kandydacie:

- Imię i nazwisko: dr inż. Łukasz Ciura
- Data uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych - 2018 rok. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Niskoczęstotliwościowe ograniczenia wykrywalności wybranych detektorów średniej podczerwieni” - *rozprawa obroniona z wyróżnieniem*
- Zatrudniony: Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Podstaw Elektroniki

### 2. Ocena osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Dr inż. Łukasz Ciura, zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust.2 pkt.2b, w rozumieniu art. 219 ust.1 pkt.2b ustawy z dnia 25 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 z późn. zm.) przedstawił osiągnięcie naukowe zatytułowane: "Eksperymentalne badania szumów małej częstotliwości w przyrządach i materiałach wykorzystywanych w detekcji podczerwieni", w oparciu o cykl 9 powiązanych tematycznie artykułów naukowych (oznaczonych jako C1-C9) opublikowanych w recenzowanych czasopismach międzynarodowych oraz autoreferat wraz z opisem osiągnięcia naukowego i stosowne dokumenty związane z postępowaniem habilitacyjnym. Przedstawione osiągnięcie naukowe jest podsumowaniem wyników badań prowadzonych przez Autora w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki w Politechnice Rzeszowskiej przy aktywnej współpracy z uznanymi instytutami badawczymi w Polsce, a w szczególności dotyczące

- roli szumów w ograniczaniu wykrywalności [C1];
- szumów typu 1/f w odniesieniu do składowych prądu w detektorach fotowoltaicznych [C2, C3];

- szumów  $1/f$  w supersieciowych detektorach fotoprzewodzących [C4, C5];
- szumów małej częstotliwości jako miary jakości kontaktów i materiałów dla detekcji podczerwieni [C6-C9]

Pierwsze dwa obszary działalności naukowej należy zaliczyć do badań podstawowych z zakresu analizy podstaw generacji i wyznaczania parametrów szumów w odniesieniu do jednego z najważniejszych parametrów użytkowych fotodetektorów jakim jest detekcyjność. Autor podając definicję detekcyjności podkreśla, że najczęściej w wyznaczaniu wielkości szumów uwzględnia się szum termiczny i szum śrutowy, a pozostałe składowe szumu, w szczególności szumy małej częstotliwości są pomijane. W pracy [C1] koncentruje się na określeniu wpływu poszczególnych składników szumów na wykrywalność, w szczególności zbadanie zasadności uproszczenia równania (oznaczonego jako 2 w autoreferacie) wynikającego z pominięcia szumów małej częstotliwości ( $S_{\text{other}} \approx S_{\text{mecz}} \approx 0$ ). W tym celu badał trzy architektury detektorów optymalizowanych dla detekcji promieniowania w zakresie średnich długości fali p-i-n, p-Bbulk-i-n z barierą elektronową AlSb oraz p-BSL-i-n z barierą elektronową z supersieci AlSb/GaSb. Należy podkreślić, że Habilitant skoncentrował się na konstrukcjach i materiałach dla fotodetektorów, które są w tej chwili uważane za najbardziej perspektywiczne dla zastosowań w zakresie średnich fali w podczerwieni (infrared, MWIR). Na podstawie wykonanych pomiarów wykazał że szumy małej częstotliwości są znaczne nawet dla niewielkich napięć ( $U = -10\text{mV}$ ), a kształt ich gęstości widmowej mocy jest zbliżony do zależności typu  $1/f$ . Do analizy wyników zastosował trzy metody szacowania wykrywalności: - aproksymacje uwzględniające jedynie gęstość widmową mocy szumu termicznego i śrutowego obliczoną podanymi zależnościami analitycznymi, - aproksymację uwzględniającą dodatkowo gęstość widmową mocy szumu  $1/f$  obliczoną z zależności empirycznej  $S_{\text{other}} = S1/f = \alpha I^2/f$ , oraz - aproksymację na podstawie bezpośrednich pomiarów gęstości widmowej mocy szumów. Habilitant stwierdził, że uwzględnienie szumów małej częstotliwości powoduje, że wykrywalność maleje. Spadek ten jest znaczny, bo sięga nawet dwóch rzędów wielkości. W mojej ocenie przeprowadzone badania i udokumentowane wyniki badań oraz ich analiza są istotnym wkładem w rozwój dyscypliny AEEiTK. Autor pokazał, że dla różnych struktur detekcyjnych zasilanych napięciem szumy małej częstotliwości znacznie przeważają nad szumami białymi i nie można ich pomijać w ocenie szumów w fotodetektorach w zakresie niskich częstotliwości.

Kolejne badania szumów  $1/f$  dotyczyły wyznaczania podstawowych składowych prądu ciemnego w detektorach barierowych przeznaczonych do pracy bez chłodzenia kriogenicznego z absorberem InAsSb. Wyniki badań, podsumowane w pracy C2, zostały przeprowadzone w

celu opracowania metodologii wyznaczania parametrów szumowych w funkcji temperatury (metodologia wyznaczania współczynników szumów dla poszczególnych składowych). Badano i analizowano detektory barierowe z absorberem InAsSb oraz absorberem z HgCdTe. Równolegle dr inż. Łukasz Ciura prowadził modelowanie zmierzonego prądu, polegające na dopasowaniu charakterystyk opisanych zależnościami teoretycznymi dla prądu dyfuzyjnego  $I_{diff}$  i prądu generacyjno-rekombinacyjnego  $I_{g-r}$ . W wyniku modelowania określono składowe  $I_{diff}(T)$  i  $I_{g-r}(T)$  i zidentyfikowano zakresy ich dominacji w funkcji temperatury. Na podstawie przebiegów zależności stwierdził, że upływność jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za powstanie szumu  $1/f$  w badanych detektorach. Habilitant zaznaczył, że tylko w detektorach wysokiej jakości konieczne jest uwzględnianie składowej generacyjno-rekombinacyjnej prądu ciemnego. W kolejnych badaniach Habilitant badał szumy  $1/f$  fotoprądu w odniesieniu do szumów  $1/f$  prądu ciemnego w różnych opisanych klasach detektorów (praca C3). Przedmiotem badań były detektory: heterozłączone z HgCdTe, barierowe z absorberem z supersieci InAs/GaSb, kaskadowe z absorberem z supersieci InAs/GaSb oraz kaskadowe z absorberem z supersieci InAs/InAsSb. Ta klasa fotodetektorów (wieloskładnikowe heterostrukтуры oraz struktury kwantowe) jest obecnie podstawą rozwoju technologii i konstrukcji najbardziej zaawansowanych detektorów promieniowania na pasma LWIR i MWIR. Wykazał, że szum  $1/f$  dla fotoprądu występuje we wszystkich badanych strukturach oraz stwierdzono, że dla wszystkich struktur detektorowych prąd ciemny generuje szum  $1/f$  znacznie wydajniej niż fotoprąd. Określił pochodzenie szumu  $1/f$  dla fotoprądu wykazując liniową korelację wartości gęstości widmowej mocy szumów  $1/f$  fotoprądu i prądu ciemnego. Wskazanie źródła szumu  $1/f$  dla fotoprądu oraz ilościowe zbadanie intensywności szumów  $1/f$  fotoprądu, w odniesieniu do szumu prądu ciemnego w nowoczesnych detektorach podczerwieni jest osiągnięciem stanowiącym istotny wkład w rozwój dyscypliny AEEiTK. Szczególnie to osiągnięcie ma charakter nowatorski ze względu na jedynie nieliczne doniesienia o takich pomiarach raportowane dla detektorów HgCdTe. Zagadnienie generowania szumu  $1/f$  przez fotoprąd ma duże znaczenie praktyczne.

Kolejnym zagadnieniem omówionym przez Habilitanta w osiągnięciu naukowym, a szczególnie w publikacjach, są badania dotyczących szumów w przyrządach dalekiej podczerwieni z zastosowaniem supersieci InAs/GaSb i InAs/InAsSb. Materiały te należą do grupy nowoczesnych materiałów, zaawansowanych struktur przyrządowych i rozwiązań technologicznych dla potrzeb detektorów nowej generacji. W ostatnich latach dominują prace związane z optymalizacją technologii i konstrukcji detektorów i laserów kaskadowych z zastosowaniem w warstwach epitaksjalnych antymonu Sb (struktury poczwórne a nawet

pięciokładnikowe). Przedstawione wyniki badań otrzymane przez dr inż. Łukasza Ciurę są pierwszymi, w których omówiono wyznaczone doświadczalnie temperaturowe zależności szumów małej częstotliwości w fotorezystorach wykonanych z wymienionych supersieci. Habilitant podjął również próbę wyjaśnienia charakteru obserwowanych zależności i identyfikacji mechanizmów leżących u ich podstaw. Prace oznaczone w opisie osiągnięcia jako C4 i C5 są podsumowaniem prowadzonych badań. Na podstawie badań eksperymentalnych zostały wyznaczone po raz pierwszy charakterystyki szumów  $1/f$  w fotorezystorach z supersieci InAs/InAsSb dla pasma LWIR i VLWIR w szerokim zakresie temperatur. Dodatkowo w oparciu o model fluktuacji ruchliwości, z uwzględnieniem dwóch mechanizmów rozpraszania nośników, zaproponował ich interpretację. Wykazał, że w detektorach LWIR szumy  $1/f$  związane są z rozpraszaniem na fononach akustycznych, natomiast w detektorach VLWIR dominującym źródłem tych szumów jest rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach. Habilitant wykazał również, że szum  $1/f$  w detektorach fotoprzewodzących jest konsekwencją fluktuacji dziur, a nie elektronów. Praktycznym wnioskiem wynikającym z porównania szumów  $1/f$  dla fotodetektorów z różnymi supersieciami z zastosowaniem heterostruktury InAs/GaSb oraz heterostruktury InAs/InGaSb jest stwierdzenie, że heterostruktury InAs/GaSb lepiej spełniają wymagania konstrukcji detektorów do pracy w wysokich temperaturach (detektory HOT).

Ostatnim zagadnieniem badawczym omówionym w opisie osiągnięcia były rozważania dotyczące zastosowania pomiarów szumów małej częstotliwości do określenia jakości kontaktów i materiałów stosowanych w konstrukcjach detektorów promieniowania w zakresie podczerwieni. W badaniach dr inż. Łukasz Ciura skoncentrował się m.in. na wyznaczeniu zależności między nieliniowością kontaktów a szumem  $1/f$ , metodzie identyfikacji szumów od kontaktów i objętości materiału z zastosowaniem funkcji koherencji, charakteryzacji szumów  $1/f$  pochodzących od objętości materiału z wykorzystaniem czterokontaktowej techniki pomiarowej oraz na wyznaczaniu parametrów defektów w absorberze detektorów fotowoltaicznych za pomocą spektroskopii szumowej. Na podstawie badań nieliniowości charakterystyk prądowo – napięciowych Autor wykazał, że: szum  $1/f$  w strukturach półprzewodnikowych może pochodzić od kontaktów, przy czym kontakty liniowe charakteryzują się znacznie mniejszym poziomem szumów  $1/f$  niż kontakty nieliniowe. Potwierdził, że szumy  $1/f$  stanowią cenne narzędzie oceny jakości kontaktów. Wkład pracy tych badań w rozwój dyscypliny AEEiTK polega na wykazaniu, że: szum  $1/f$  w strukturach półprzewodnikowych może pochodzić od kontaktów, przy czym kontakty liniowe

charakteryzują się znacznie mniejszym poziomem szumów  $1/f$  niż kontakty nieliniowe, dla których szum  $1/f$  zależy od stopnia tej nieliniowości. Potwierdził, że szумы  $1/f$  stanowią cenne narzędzie oceny jakości kontaktów. Wiedząc, z analizy danych literaturowych, że istotnym problemem w analizie szumów  $1/f$  jest identyfikacja składowych szumów pochodzących od kontaktów metal-półprzewodnik i objętości materiału, zaproponował wykorzystanie do tego celu funkcji koherencji, służącej do wykrywania liniowej zależności pomiędzy dwoma sygnałami. Metodę zastosowano do wyznaczenia przewidywanych wartości funkcji koherencji dla różnych par kontaktów struktury testowej TLM wykonanej z arsenku indu ( $\text{InAs}$ ). Zastosowanie funkcji koherencji do identyfikacji źródeł szumów  $1/f$  w planarnej strukturze półprzewodnikowej z wieloma kontaktami (struktura TLM), w tym opracowanie modelu teoretycznego oraz jego weryfikacja eksperymentalna jest ważnym wkładem w rozwój metod wyznaczania szumów niskoczęstotliwościowych  $1/f$  w półprzewodnikach. Kolejnym krokiem w poszerzeniu możliwości pomiarowych umożliwiających zaobserwowanie szumów wynikających z właściwości materiału (a nie kontaktów) było zastosowanie techniki pomiarowej zaproponowanej przez Vandamme do cienkich warstw wytworzonych metodami epitaksji (metoda czterokontaktowa). W pracy C8 Habilitant eksperymentalnie wykazał użyteczność czteropunktowej sondy pomiaru szumów do wyznaczenia właściwości szumowych objętości materiału (w zakresie małych częstotliwości) na przykładzie pomiarów i analizy testowej struktury epitaksjalne GaSb.

Dr inż. Łukasz Ciura w pracy C9 podsumował wyniki badań związanych z zastosowaniem metody spektroskopii szumowej w zakresie niskich częstotliwości LFNS do identyfikacji poziomów defektowych w materiale trójskładnikowym  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Bazując na analizie kształtu gęstości widmowej mocy w funkcji temperatury i identyfikacji procesów o widmie Lorentza, które są utożsamiane z procesami generacji-rekombinacji zachodzącymi między poziomem pułpkowym, związanym z defektem, a pasmem walencyjnym lub przewodnictwa na podstawie teorii Shockleya-Reada-Halla, Habilitant wyznaczył energie aktywacji poziomów defektowych, a na podstawie analizy opisał typy pułapek oraz miejsca występowania defektu w strukturze energetycznej. Przeprowadził również analizę porównawczą z wynikami badań defektów w tym samym materiale z zastosowaniem techniki DLTS, uzyskując dużą zgodność wyników.

W podsumowaniu recenzji osiągnięć badawczych i uzyskanych wynikach mogą stwierdzić, że badania te są ważne dla rozwoju dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Rezultaty badań mechanizmów decydujących o

charakterze występujących szumów, zaproponowane techniki pomiarowe, stosowane badania symulacyjne oraz współpraca z ośrodkami krajowymi w zakresie opracowania struktur testowych z zastosowaniem materiałów półprzewodnikowych wieloskładnikowych związków typu AIII BV i AII BVI stanowią istotny i ważny wkład w rozwój techniki detekcji promieniowania w podczerwieni. **Stwierdzam, że opisane osiągnięcie naukowe wraz z wymienionymi publikacjami spełnia kryteria oceny dorobku naukowego stanowiące podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego.**

### **3. Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny**

#### **3.1. Informacja o osiągnięciach naukowych, o których mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2 ustawy**

Recenzent przedstawił w pkt.2 swoją opinię, na podstawie tematycznie powiązanych 9 artykułów naukowych, które były podstawą opisu osiągnięcia naukowego w przedstawionym autoreferacie. Zgodnie z wymogami ustawy zostały wymienione publikacje (oznaczone C.1.– C.9.) z uwzględnieniem składu współautorów, danych naukowych oraz zawarte oświadczenia habilitanta wskazujące jego merytoryczny wkład w powstanie każdej z wymienionych prac, a także stosowne oświadczenia współautorów. Określenie wkładu habilitanta oraz współautorów jest bardzo dokładne i umożliwiło recenzentowi pozytywnie ocenić jego udział i rolę w powstaniu każdej pracy. Przedstawiono zestawienie dorobku składającego się na opiniowane osiągnięcie naukowe. Pozytywnie oceniam wkład habilitanta w merytoryczne opracowanie wymienionych publikacji i przygotowanie ich do publicznej prezentacji. Dane pozyskane z różnych baz naukowych są bardzo zbliżone i potwierdzają aktywność naukową habilitanta w okresie po otrzymaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

#### **3.2 Informacja o aktywności naukowej habilitanta (aktywność publikacyjna)**

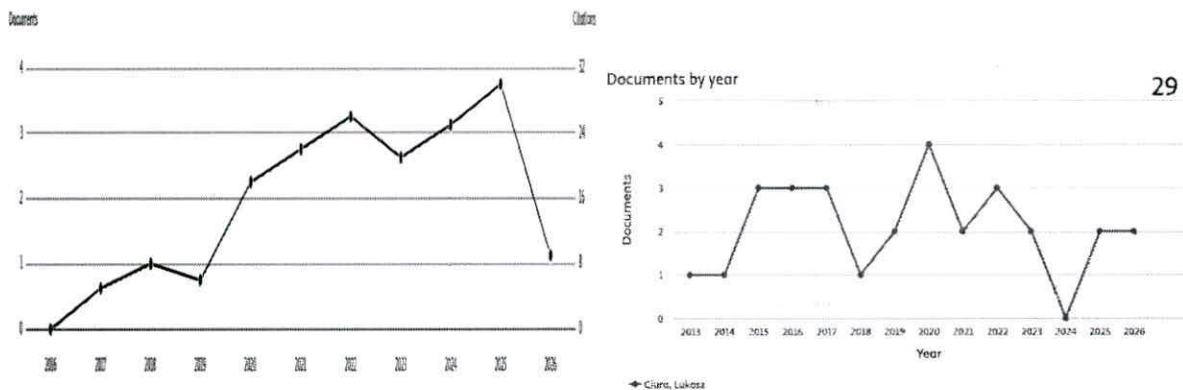
Wyniki badań będące przedmiotem powyższych osiągnięć prezentowanych w publikacjach były również tematem wystąpień na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych. W dokumencie zawarte są również wszystkie publikacje w pełnej wersji związane z osiągnięciem naukowym, wykazy opublikowanych artykułów w czasopiśmie, w tym o obiegu międzynarodowym. Dr inż. Łukasz Ciura prezentował wyniki swoich badań na 9 konferencjach o zasięgu międzynarodowym w tym 4 po obronie pracy doktorskiej. Brał udział w konferencjach krajowych. Wygłosił 5 referatów w tym 2 przed doktoratem. Jeden z referatów

pt. „Four-point probe resistivity noise measurements of GaSb layers” wygłosił na zaproszenie w sesji specjalnej „Technologie dla detekcji sygnałów z zakresu podczerwieni” na XVIII Krajowej Konferencji Elektroniki w 2019 roku.

### Statystyka dotycząca całości dorobku naukowego dr inż. Łukasza Ciury

Indeks Hirscha: Scopus 10 (9 bez autocytowań), Web of Science 9

Liczba prac w bazie: 29 (od doktoratu 18)



Cytowania: 230 (170 bez autocytowań)

Pozytywnie oceniam aktywność publikacyjną habilitanta po otrzymaniu stopnia doktora (doktorat obroniony w 2018). Łączna liczba publikacji na podstawie bazy danych Scopus i Web of Science wynosi 29 (18 po doktoracie). Liczba cytowań wynosi 170 (bez autocytowań) a indeks Hirscha 9. Na podstawie przedstawionych danych statystycznych należy podkreślić zwiększoną aktywność naukową i publikacyjną w ostatnich 10 latach. Obserwowany jest znaczny wzrost ilości publikacji oraz wzrost ilości cytowań publikowanych wyników badań prowadzonych przez dr inż. Łukasza Ciurę. Niewątpliwie wzrost ilości cytowań związany jest ze wzrostem ilości publikacji w czasopiśmie o cyrkulacji międzynarodowej, ale równocześnie należy podkreślić, że wzrost ilości cytowań potwierdza zainteresowanie środowiska naukowego tematyką badawczą Habilitanta. Powyższe korelacje potwierdzają inną, bardzo ważną prawidłowość w wypadku publikowania w czasopiśmie o wysokiej randze naukowej. W takich czasopiśmie manuskrypty (szczególnie z wyższym indeksem IF) podlegają bardzo ostrej recenzji i dopuszczenie do publikowania jest pewną miarą uznania, docenienia poziomu prezentowanych wyników badań przez Autora. Zainteresowanie tematyką i wynikami prowadzonych badań bezpośrednio udokumentowane jest zaproszeniem Habilitanta do recenzowania prac naukowych w czasopiśmie międzynarodowych o wysokim indeksie IF. Recenzował prace naukowe dla IEEE Transactions on Electron Devices – 6 recenzji, Advanced Optoelectronic Materials - 2 recenzje, MDPI Applied Sciences - 2 recenzje oraz dla Optical

and Quantum Electronics – 1. Omówione powyższe osiągnięcia i uwagi upoważniają do stwierdzenia, że przedstawiony **dorobek naukowy jest zgodny z reprezentowaną dyscypliną naukową i stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej AEEiTK.**

### **3.3 Informacja o udziale w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane oraz działalności powiązanej z tym obszarem aktywności.**

W latach 2015 – 2025 Habilitant brał czynny udział w realizacji badań naukowych finansowanych w ramach programów: Narodowego Centrum Nauki NCN PRELUDIUM nr projektu 2014/13/N/ST7/03074 i NCN OPUS nr projektu 2020/37/B/ST7/01830, programu NCBiR TECHMATSTRATEG Nr 1/347751/5/NCBR/2017, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr projektu 027/RID/2018/19. W projektach pełnił odpowiednio funkcje kierownika, wykonawcy oraz koordynatora zadania. Potwierdza to nie tylko aktywność w kreowaniu tematyki badawczej, ale również dużą aktywność w prowadzeniu badań zespołowych.

### **4. Informacja o współpracy z otoczeniem gospodarczym**

Analizując udział dr inż. Łukasza Ciury w projektach należy podkreślić istotną aktywność we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi w kraju, do których należy zaliczyć Wojskową Akademię Wojskową, Instytut Technologii Materiałowych Elektronicznych, Firmę VIGO PHOTONICS S.A oraz Instytut Technologii Elektronowej (obecnie Sieć Łukaszewicza ITE). Wymienione instytucje badawcze spełniają w Polsce bardzo ważną rolę w konstrukcji, projektowaniu, technologii i produkcji przyrządów optoelektronicznych, laserów na ciele stałym, laserów półprzewodnikowych oraz detektorów promieniowania w zakresie podczerwonym. VIGO PHOTONICS jest jednym z uznanych producentem detektorów do pracy w zakresie bliskiej jak i średniej podczerwieni w skali światowej. W ramach współpracy z VIGO PHOTONICS Habilitant wygłosił referat pt. „Problematyka szumów w detektorach podczerwieni - implikacje praktyczne” przed audytorium firmy VIGO PHOTONICS S. A. – światowego lidera w produkcji niechłodzonych detektorów podczerwieni.

### **5. Opinia końcowa**

W podsumowaniu bardzo pozytywnie oceniam działalność naukową oraz zaangażowanie w działalność dydaktyczną dr inż. Łukasza Ciury. Uważam, że Habilitant jest dojrzałym naukowcem z bardzo dobrym dorobkiem naukowym. Wykazał się umiejętnością wykorzystania wiedzy teoretycznej oraz doświadczeń z zakresu technik pomiarowych i wyników modelowania zjawisk w materiałach półprzewodnikowych oraz w strukturach

testowych detektorów, w prowadzonych przez szereg lat badaniach naukowych. Jestem przekonany, że dr inż. Łukasz Ciura osiągnął dojrzałość naukową i samodzielność badawczą. Tym samym stwierdzam, że dr inż. Łukasz Ciura spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust.2 pkt.2b, w rozumieniu art. 219 ust.1 pkt.2b ustawy z dnia 25 lipca 2018 r Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 z późn. zm.) w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego i wnoszę o przeprowadzenie dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

