

## Autoreferat

### 1. Imię i nazwisko

**Łukasz Ciura**

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **2018 r., doktor nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika**

nadany przez: Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Tytuł rozprawy: „Niskoczęstotliwościowe ograniczenia wykrywalności wybranych detektorów średniej podczerwieni” - rozprawa obroniona z wyróżnieniem

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek

- **2011 r., magister, elektronika i telekomunikacja**

Studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (kierunek: elektronika i telekomunikacja)

- **2010 r., inżynier, elektronika i telekomunikacja**

Studia inżynierskie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (kierunek: elektronika i telekomunikacja, specjalność: urządzenia elektroniczne)

### 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- Katedra Podstaw Elektroniki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza:

1.10.2018 r. - do teraz: adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych.

1.03.2016 r. - 30.09.2018 r.: asystent

1.04.2015 r. - 29.02.2016 r.: asystent naukowy

1.03.2015 r. - 31.03.2015 r.: kierownik (projektu)

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

#### 4.1 Osiągnięcie - cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych

[C1] K. Czuba, Ł. Ciura, I. Sankowska, E. Papis-Polakowska i A. Jasik, "The Role of Noise in Specific Detectivity of InAs/GaSb Superlattice MWIR Bariodes," *Sensors*, vol. 21, no. 21, pp. 7005, Oct 22, 2021.

(IF<sub>2021</sub>: **3,85**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 11)

[C2] Ł. Ciura ✉, M. Kopytko i P. Martyniuk, "Low-frequency noise limitations of InAsSb-, and HgCdTe-based infrared detectors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 305, pp. 111908, 2020.

(IF<sub>2020</sub>: **3,41**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 21)

[C3] Ł. Ciura ✉, K. Dąbrowski, K. Michalczewski, L. Kubiszyn, B. Sereżyński, W. Gawron, K. Majkowycz i P. Martyniuk, "Photocurrent-Induced 1/f Noise in A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> T2SLs Infrared Detectors," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 46, no. 2, pp. 155-158, Feb, 2025.

(IF<sub>2024</sub>: **4,5**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 1)

[C4] Ł. Ciura ✉, A. Kolek, K. Michalczewski, K. Hackiewicz i P. Martyniuk, "1/f Noise in InAs/InAsSb Superlattice Photoconductors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 8, pp. 3205-3210, 2020.

(IF<sub>2020</sub>: **2,92**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 10)

[C5] Ł. Ciura ✉, A. Jasik i K. Czuba, "Impact of conductivity type change in InAs/GaSb superlattice on low frequency noise of photoconductive long-wavelength infrared detectors," *Applied Physics Letters*, vol. 118, no. 26, 2021.

(IF<sub>2021</sub>: **3,97**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 1)

[C6] Ł. Ciura ✉, P. Śliż, D. Jarosz, P. Krzemiński i M. Marchewka, “Evaluation of Metal–Semiconductor Contact Quality: Correlation of 1/f Noise and Nonlinearity,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 69, no. 12, pp. 6999-7004, 2022.

(IF<sub>2022</sub>: **3,1**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 1)

[C7] Ł. Ciura ✉, J. Wróbel, J. Boguski i J. Wróbel, “Investigation of 1/f noise sources with the coherence function,” *Measurement*, vol. 214, 2023.

(IF<sub>2023</sub>: **5,2**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 1)

[C8] Ł. Ciura ✉, A. Kolek, D. Smoczyński i A. Jasik, “Four-point probe resistivity noise measurements of GaSb layers,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 68, no. No. 1 February, pp. 135-140, 2020.

(IF<sub>2024</sub>: **1,66**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 6)

[C9] Ł. Ciura ✉, A. Kolek, E. Gomółka, K. Murawski, M. Kopytko, P. Martyniuk i A. Rogalski, “Trap parameters in the infrared InAsSb absorber found by capacitance and noise measurements,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 10, 2019.

(IF<sub>2024</sub>: **2,37**; Cytowania<sub>WOS</sub>: 6)

#### **4.2 Parametry naukometryczne prezentowanego cyklu**

Sumaryczny *impact factor* cyklu: 30,98

Średni *impact factor* na publikację cyklu: 3,44

#### **4.3 Pozostałe osiągnięcia, poza cyklem powiązanych tematycznie artykułów naukowych**

Poniższe artykuły naukowe zostały opublikowane przed uzyskaniem przeze mnie stopnia doktora; mój udział w nich był mniejszy lub miały one inną tematykę.

[A1] Ł. Ciura ✉, A. Kolek, J. Jureńczyk, K. Czuba, A. Jasik, I. Sankowska i J. Kaniewski, “1/f Noise modeling of InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared detectors,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 1-11, 2017.

- [A2] L. Ciura ✉, A. Kolek, J. Jureńczyk, K. Czuba, A. Jasik, I. Sankowska, E. Papis-Polakowska i J. Kaniewski, “Noise-Current Correlations in InAs/GaSb Type-II Superlattice Midwavelength Infrared Detectors,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 12, pp. 4907-4912, 2016.
- [A3] L. Ciura ✉, A. Kolek, A. Kębłowski, D. Stanaszek, A. Piotrowski, W. Gawron i J. Piotrowski, “Investigation of trap levels in HgCdTe IR detectors through low frequency noise spectroscopy,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 035004, 2016.
- [A4] L. Ciura ✉, A. Kolek, J. Wrobel, W. Gawron, i A. Rogalski, “1/f Noise in Mid-Wavelength Infrared Detectors With InAs/GaSb Superlattice Absorber,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, no. 6, pp. 2022-2026, 2015.
- [A5] J. Wróbel, Ł. Ciura, M. Motyka, F. Szmulowicz, A. Kolek, A. Kowalewski, P. Moszczyński, M. Dyksik, P. Madejczyk, S. Krishna i A. Rogalski, “Investigation of a near mid-gap trap energy level in mid-wavelength infrared InAs/GaSb type-II superlattices,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 11, pp. 115004, 2015.
- [A6] Ł. Ciura ✉, A. Kolek, W. Gawron, A. Kowalewski i D. Stanaszek, “Measurements of Low Frequency Noise of Infrared Photo-Detectors with Transimpedance Detection System,” *Metrology and Measurement Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 461-472, 2014.
- [A7] Ł. Ciura ✉, J. Jagiełło, A. Dobrowolski, K. Piętak-Jurczak i T. Ciuk, “Sensitivity of Low-Frequency Noise to Thermal Stress in a Graphene-on-SiC Hall Effect Sensor Dedicated to Elevated Temperatures,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 72, no. 4, pp. 2000-2005, 2025.
- [A8] J. Boguski, J. Wróbel, S. Zlotnik, B. Budner, M. Liszewska, L. Kubiszyn, P. P. Michałowski, L. Ciura, P. Moszczyński, S. Odrzywolski, B. Jankiewicz i J. Wróbel, “Multi-technique characterisation of InAs-on-GaAs wafers with circular defect pattern,” *Opto-Electronics Review*, vol. 31, 2023.
- [A9] T. Ciuk, Ł. Ciura, P. P. Michałowski, J. Jagiełło, A. Dobrowolski, K. Piętak, D. Kalita, M. Wzorek, R. Budzich, D. Czołak i A. Kolek, “Contamination-induced inhomogeneity of noise sources distribution in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-passivated quasi-free-standing graphene on 4H-SiC(0001),” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 142, pp. 115264, 2022.
- [A10] K. Hackiewicz, M. Kopytko, J. Rutkowski, P. Martyniuk i L. Ciura, “Influence of GaAs and GaSb substrates on detection parameters of InAs/GaSb superlattice-based mid-infrared interband cascade photodetectors,” *Applied Optics*, vol. 59, no. 17, pp. E42-E47, Jun 10, 2020.

#### 4.4 Opis osiągnięcia naukowego w postaci powiązanych tematycznie artykułów naukowych

##### *Wprowadzenie*

Tematem mojego osiągnięcia naukowego, w postaci cyklu dziewięciu publikacji [C1-C9], są *eksperymentalne badania szumów małej częstotliwości w przyrządach i materiałach wykorzystywanych w detekcji podczerwieni*. W cyklu wyodrębniłem cztery wątki badawcze:

- *rola szumów w ograniczaniu wykrywalności [C1];*
- *szумы 1/f a składowe prądu w detektorach fotowoltaicznych [C2, C3];*
- *szумы 1/f w supersieciowych detektorach fotoprzewodzących [C4, C5];*
- *szумы małej częstotliwości jako miara jakości kontaktów i materiałów dla detekcji podczerwieni [C6-C9].*

Pomimo szerokiego zakresu tematycznego cyklu, badania te łączy wspólna problematyka: zjawisko szumów, eksperymentalna metoda badań (pomiar) oraz ukierunkowanie na kompletne struktury detekcyjne bądź materiały wykorzystywane w detekcji podczerwieni.

Wszystkie artykuły składające się na osiągnięcie w formie cyklu publikacji zostały opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora i we wszystkich jestem wiodącym autorem. W ośmiu z nich jestem pierwszym i jednocześnie autorem korespondencyjnym. Obecność współautorów w każdej pracy (spoza jednostki habilitanta), a tym samym brak prac jedno autorskich, wynika z charakteru prowadzonych badań, które skupione są na eksperymentalnej charakteryzacji przyrządów i materiałów wytworzonych w wyspecjalizowanych ośrodkach naukowych. Wytworzenie takich struktur i ich charakteryzacja w ramach pracy naukowej jednej osoby nie jest możliwa. Szczegółowy wkład w każdą z publikacji cyklu opisano w załączniku do wniosku zatytułowanym „Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny”. Ogólnie wkład ten polegał na przeprowadzeniu pomiarów szumów, opracowaniu wyników oraz ich interpretacji i dyskusji, a także na sporządzaniu manuskryptów publikacji.

## Wstęp

Szumy elektryczne stanowią istotny problem wszędzie tam, gdzie obecny jest sygnał użyteczny - określają one dolny limit jego detekcji. W zagadnieniu detekcji promieniowania podczerwonego, wydajność detektorów opisuje się parametrem wykrywalności  $D^*$ , który zdefiniowany jest w odniesieniu do szumów własnych detektora [1]:

$$D^* = R_i(A\Delta f)^{1/2}/I_n = R_u(A\Delta f)^{1/2}/U_n, \quad (1)$$

gdzie  $R_i$  i  $R_u$  to czułość (prądowa lub napięciowa),  $A$  to powierzchnia detektora,  $\Delta f$  to pasmo częstotliwości a  $I_n$  i  $U_n$  to wartości skuteczne szumów prądowych lub napięciowych w tym paśmie. W detektorach podczerwieni występuje kilka podstawowych typów szumów, wśród których szum termiczny (Johnsona) i szum śrutowy (Schottky'ego) należą do szumów białych, których poziomy można wyznaczyć na podstawie dobrze znanych modeli analitycznych. Równie powszechne są szumy małej częstotliwości, głównie o gęstości widmowej mocy typu  $1/f$ , badane w detektorach podczerwieni od wielu lat [2-13]. Taki rodzaj szumu ogranicza detekcję wolnozmiennych źródeł promieniowania. W przeciwieństwie do szumów białych, wartość szumów małej częstotliwości trudno jest oszacować, ze względu na brak jednej, uniwersalnej przyczyny ich występowania oraz trudności precyzyjnego określenia parametrów nielicznych modeli teoretycznych. W związku z tym eksperyment pozostaje jedyną wiarygodną metodą ich charakteryzacji.

Potrzeba tego rodzaju badań jest nadal aktualna ze względu na ciągły rozwój w dziedzinie detekcji podczerwieni. Przejawia się on m.in. poszukiwaniem nowych architektur przyrządów, takich jak detektory kaskadowe [14], czy też stosowaniem nowych materiałów, takich jak supersieci drugiego rodzaju [15, 16]. Te nowe rozwiązania wymagają poznania właściwości szumowych, gdyż redukcja szumów jest jednym z celów stawianych detektorom podczerwieni nowej generacji [17].

„Szum jest sygnałem” [18] - to sformułowanie R. Landauera najlepiej oddaje jego dwoistą naturę. Z jednej strony ogranicza on detekcję sygnału, z drugiej zaś stanowi źródło wiedzy o materiale lub strukturze, w której powstaje. W tym aspekcie szumy małej częstotliwości powszechnie wiąże się z jakością materiałów i przyrządów elektronicznych [19-22]. Wykazano, że szum  $1/f$  jest wielkością wrażliwą zarówno na mechanizmy transportu nośników ładunku [3, 4, 23, 24], jak i na obecność defektów w strukturze lub na powierzchni detektora [7, 9, 25-27]. Ponadto badanie innego rodzaju szumu małej częstotliwości tj. szumu

generacyjno-rekombinacyjnego (technika spektroskopii szumowej), pozwala określić parametry tych defektów w materiałach półprzewodnikowych [28-30]. Analiza szumów małej częstotliwości dostarcza więc cennych informacji o jakości detektorów podczerwieni, istotnych zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego - jako sprzężenie zwrotne dla projektantów przyrządów i technologii.

### ***Rola szumów w ograniczaniu wykrywalności [C1]***

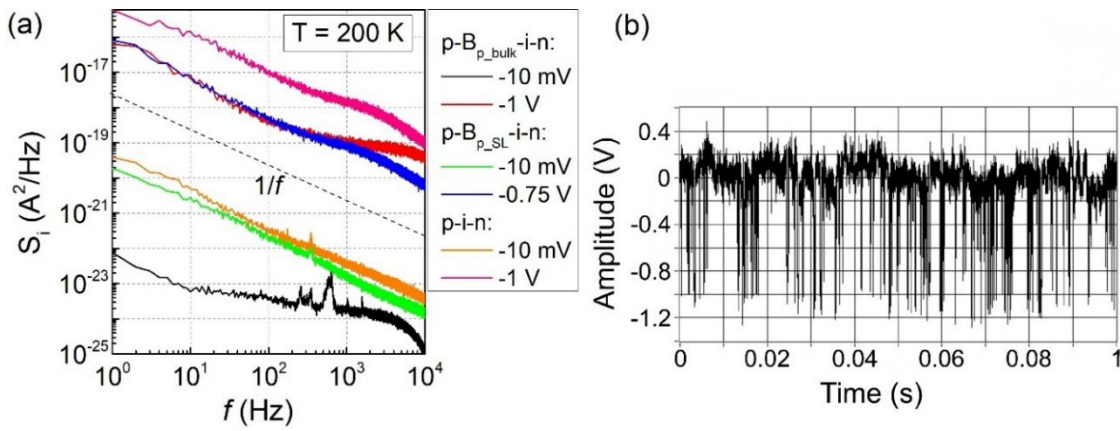
Wykrywalność, zdefiniowana ogólnie równaniem (1), jest parametrem często podawanym w notach katalogowych detektorów i w pracach raportujących osiągi nowych, ulepszonych przyrządów. Jak wspomniano, procedura jej wyznaczania wymaga jednak oszacowania wartości skutecznej szumów detektora. Wyznacza się ją jako pierwiastek z iloczynu gęstości widmowych mocy różnych typów szumów i rozpatrywanego pasma częstotliwości. W tym istotnym kroku, w przeważającej większości, uwzględnia się tylko szum termiczny i szum śrutowy, a pozostałe składowe szumu, w szczególności szumy małej częstotliwości, pomija się [31-38]. Gęstość widmową mocy  $S_{jn}$  szumu termicznego (Johnsona), czyli fluktuacje wywołane ruchem cieplnym, wyznacza się z zależności  $S_{jn} = 4kT/R_0$ , gdzie  $k$  to stała Boltzmana,  $T$  to temperatura, a  $R_0$  to rezystancja detektora (przy braku napięcia polaryzacji). Gęstości widmową mocy  $S_{sn}$  szumu śrutowego, wynikającego z korpuskularnej natury prądu, wyznacza się z zależności Schottky'ego:  $S_{sn} = 2qI$ , gdzie  $q$  jest ładunkiem elementarnym, a  $I$  jest wartością średnią prądu. Dla detektorów fotowoltaicznych, dla których rozważana jest odpowiedź prądowa, ta uproszczona zależność na wykrywalność przyjmuje postać [1]:

$$D^* = R_i \sqrt{A} / \sqrt{(S_{jn} + S_{sn} + S_{other})} \cong R_i \sqrt{A} / \sqrt{4kT/R_0 + 2qI} . \quad (2)$$

**C1.** Celem pracy [C1] było określenie wpływu poszczególnych składników szumów na wykrywalność, w szczególności zbadanie zasadności uproszczenia równania (2) wynikającego z pominięcia szumów małej częstotliwości ( $S_{other} \approx S_{mcz} \approx 0$ ). W tym celu zbadano trzy architektury detektorów optymalizowanych do detekcji promieniowania w zakresie średnich długości fali (ang. *mid-wavelength infrared*, MWIR): p-i-n, p-B<sub>bulk</sub>-i-n z barierą elektronową AlSb oraz p-B<sub>SL</sub>-i-n z barierą elektronową z supersieci AlSb/GaSb.

Dla każdej z badanych struktur zmierzono parametry niezbędne do wyznaczenia wykrywalności: czułość prądową  $R_i$ , wartość średnią prądu  $I$ , wyznaczono rezystancję  $R_0$ , a także gęstość widmową mocy szumów prądowych w paśmie częstotliwości 1 Hz - 10 kHz w funkcji napięcia polaryzacji i temperatury. Wyniki pomiarów gęstości widmowej mocy

szumów, uzyskane dla temperatury  $T = 200$  K, dla niewielkiego ( $U = -10$  mV) i dużego ( $U \approx -1$  V) napięcia polaryzacji w kierunku zaporowym, przedstawiono na rys. 1 (a). Pokazują one, że w rozważanym paśmie, szумы małej częstotliwości są znaczne nawet dla niewielkich napięć ( $U = -10$  mV), a kształt ich gęstości widmowej mocy jest zbliżony do zależności typu  $1/f$ . Odchylenia od takiej zależności związane z obecnością szumów typu *random telegraph noise*, czyli dwustanowych fluktuacji obserwowanych w przebiegu sygnału szumowego (rys. 1 (b)). Charakteryzują się one gęstością widmową mocy opisaną zależnością  $S = A/(1+(f/f_c)^2)$ , gdzie  $A$  jest stałą związaną z intensywnością szumu, a  $f_c$  jest częstotliwością charakterystyczną procesu szumowego.



**Rys. 1 (a)** Gęstość widmowa mocy szumów prądowych zmierzona w temperaturze  $T = 200$  K dla dwóch napięć polaryzacji. **Rys. 1. (b)** Przebieg sygnału szumu na wyjściu wzmacniacza transimpedancyjnego (wzmocnienie  $10^8$  V/A) dla struktury  $p$ - $B_{p\_bulk}$ - $i$ - $n$ ,  $T = 200$  K,  $U = -50$  mV, ilustrujący obecność szumu typu *random telegraph noise*. Źródło rysunku: publikacja [C1].

W przeprowadzonej analizie rozważano trzy metody szacowania wykrywalności: (a)  $D^*_{approx\_1}$  - aproksymacja uwzględniająca jedynie gęstość widmową mocy szumu termicznego i śrutowego obliczona podanymi zależnościami analitycznymi (końcowa forma równania (2)), (b)  $D^*_{approx\_2}$  - aproksymacja uwzględniająca dodatkowo gęstość widmową mocy szumu  $1/f$  obliczona zależnością empiryczną  $S_{other} = S_{1/f} = \alpha^2/f$ , (c)  $D^*_{exp}$  - aproksymacja na podstawie bezpośrednich pomiarów gęstości widmowej mocy szumów. Współczynnik  $\alpha$ , charakteryzujący intensywność szumu  $1/f$ , konieczny do obliczenia wykrywalności  $D^*_{approx\_2}$ , wyznaczono na podstawie zależności gęstości widmowej mocy  $S_i(f = 1$  Hz) od prądu  $I$  w funkcji temperatury. Obliczenia wykrywalności przeprowadzono w temperaturze  $T = 210$  K, dla częstotliwości  $f = 10$  kHz i czułości prądowej wyznaczonej dla długości fali  $\lambda = 4$   $\mu$ m. Rozważano przypadek detektora niezasilanego ( $U \approx 0$  V) i zasilanego (spolaryzowanego) znacznym napięciem w kierunku zaporowym ( $U \approx -1$  V). W tabeli 1 zamieszczono wyniki

obliczeń i pomiarów gęstość widmową mocy szumów oraz wykrywalności dla wszystkich trzech opisanych podejść. Uwzględnienie szumów małej częstotliwości powoduje, że wykrywalność maleje - w każdym przypadku zachodzi relacja  $D^*_{\text{approx}_1} > D^*_{\text{approx}_2}, D^*_{\text{exp}}$ . Spadek ten jest znaczny, bo sięga nawet dwóch rzędów wielkości. Sposób uwzględnienia szumów małej częstotliwości odgrywa tu drugorzędną rolę, ale podejście z wykorzystaniem współczynnika  $\alpha$  może prowadzić zarówno do przeszacowania jak i niedoszacowania wykrywalności w stosunku do wartości uzyskanej na podstawie zmierzonej gęstości widmowej mocy szumu. Wynika to z występowania, obok szumu typu  $1/f$ , innych rodzajów szumów małej częstotliwości, jak pokazano na rys. 1 (b).

**Tabela 1.** Wykrywalność ( $D^*$ ) i gęstości widmowej mocy szumów wyznaczone dla detektorów zasilanych ( $U \approx -1$  V) i niezasilanych ( $U = 0$  V) napięciem, w temperaturze  $T = 210$  K. Czulość prądowa określono przy  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ , a gęstości widmowej mocy szumów dla  $f = 10$  kHz.

Photodiode	U (V)	$S_{i\_approx\_1}$ (A <sup>2</sup> /Hz)	$S_{i\_approx\_2}$ (A <sup>2</sup> /Hz)	$S_{i\_exp}$ (A <sup>2</sup> /Hz)	$D^*_{\text{approx}_1}$ (Jones)	$D^*_{\text{approx}_2}$ (Jones)	$D^*_{\text{exp}}$ (Jones)
p-i-n	0	$3.45 \times 10^{-24}$	$3.45 \times 10^{-24}$	$3.35 \times 10^{-24}$	$1.61 \times 10^{10}$	$1.61 \times 10^{10}$	$6.16 \times 10^9$
	-0.9	$6.55 \times 10^{-22}$	$3.89 \times 10^{-18}$	$1.45 \times 10^{-19}$	$1.63 \times 10^9$	$2.11 \times 10^7$	$1.1 \times 10^8$
p-B <sub>p_bulk</sub> -i-n	0	$9.8 \times 10^{-26}$	$1.11 \times 10^{-25}$	$3.59 \times 10^{-26}$	$1.43 \times 10^8$	$1.35 \times 10^8$	$2.4 \times 10^8$
	-1	$1.37 \times 10^{-24}$	$1.63 \times 10^{-23}$	$4.97 \times 10^{-20}$	$2.44 \times 10^8$	$7.05 \times 10^7$	$1.3 \times 10^6$
p-B <sub>p_SL</sub> -i-n	0	$4.87 \times 10^{-25}$	$4.88 \times 10^{-25}$	$7.28 \times 10^{-25}$	$1.52 \times 10^8$	$1.52 \times 10^8$	$1.25 \times 10^8$
	-1.12	$3.27 \times 10^{-22}$	$2.27 \times 10^{-18}$	$9.34 \times 10^{-20}$	$1.76 \times 10^9$	$2.12 \times 10^7$	$1.04 \times 10^8$

Wkład pracy [C1] w rozwój dyscypliny AEEiTK polega na ilościowym pokazaniu, że dla różnych struktur detekcyjnych zasilanych napięciem szumy małej częstotliwości znacznie przeważają nad szumami białymi (co najmniej do częstotliwości 10 kHz) i nie można pomijać ich wpływu na wykrywalność. W konsekwencji powszechnie stosowane w literaturze podejście polegające na pomijaniu tego składnika szumów w obliczeniach wykrywalności prowadzi do jej znacznego przeszacowania, więc wymaga szerszego uzasadnienia.

### **Szumy 1/f a składowe prądu w detektorach fotowoltaicznych [C2, C3]**

Prąd płynący w fotowoltaicznych detektorach podczerwieni jest konsekwencją występowania wielu mechanizmów transportu nośników ładunku. Prace poświęcone modelowaniu prądu tych detektorów [39-42] identyfikują następujące składowe prądu: dyfuzyjną, generacyjno-rekombinacyjną, tunelową (pasma-pasma i przez pułapki), upływnościową oraz fotoprąd. Relacje między tymi składowymi zależą od kilku czynników np.: punktu pracy detektora (napięcie, temperatura, oświetlenie), jego jakości i struktury czy też właściwości materiałowych. Szum małej częstotliwości typu  $1/f$  w tych detektorach nie jest powiązany z całkowitym prądem detektora, lecz z poszczególnymi jego składowymi. Zależność tę po raz pierwszy zaobserwowano w detektorach HgCdTe [10, 11, 43-45]. Prace

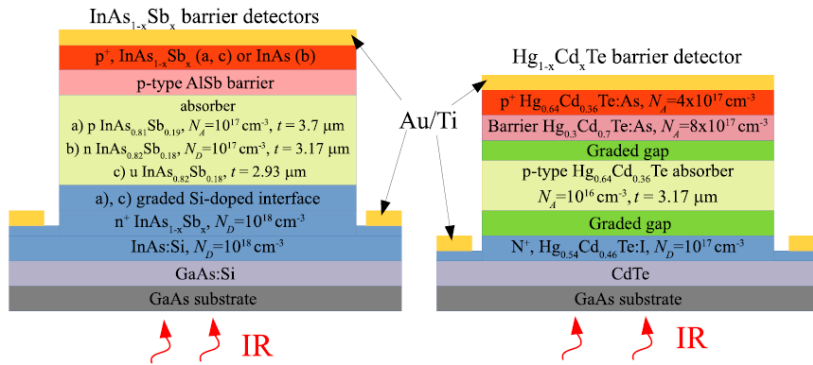
własne [23, 24, 46] potwierdziły występowanie podobnej prawidłowości w nowoczesnych detektorach z supersieci InAs/GaSb. Na tej podstawie, w empirycznym modelu szumu 1/f, składowym prądu można przypisać współczynniki wagowe, które określają przyczynki do całkowitej gęstości widmowej mocy szumu 1/f od każdego mechanizmu transportu:

$$S_{1/f}(f) = \sum_k \alpha_k I_k^{\beta_k} / f, \quad (3)$$

gdzie  $I_k^{\beta}$  to  $k$ -ty składnik prądu detektora z wykładnikiem  $\beta_k$  (2 lub 1), a  $\alpha_k$  to odpowiadający tej składowej współczynnik wagowy (parametr szumów). Wyznaczenie parametrów szumów jest nie tylko istotne poznawczo, ale stanowi praktyczną sugestię w procedurze optymalizacji (redukcji) szumów 1/f detektorów. W pierwszej kolejności poprzez minimalizację najistotniejszych z punktu widzenia generacji szumu 1/f składowych prądu, a następnie poprzez zmniejszenie współczynników odpowiadających tym składowym.

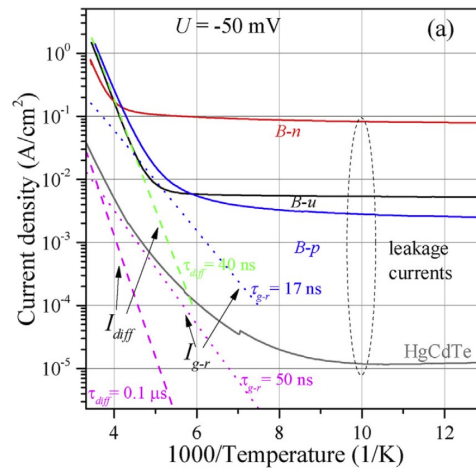
W pracach realizowanych po uzyskaniu stopnia doktora, kontynuowano i rozszerzono ten kierunek badań. W szczególności wyznaczono parametry szumów, z pomiarów w funkcji temperatury, w detektorach barierowych InAsSb i HgCdTe [C2] a także wyznaczono parametr szumu dla fotoprądu w detektorach z supersieci InAs/GaSb i InAs/InAsSb [C3]. Szczególnie osiągnięcie opisane w tej drugiej pracy ma charakter nowatorski ze względu na jedynie nieliczne doniesienia o takich pomiarach raportowane dla detektorów HgCdTe w starszych pracach [11, 47]. Zagadnienie generowania szumu 1/f przez fotoprąd ma duże znaczenie praktyczne. W przeciwieństwie do prądu ciemnego, który można ograniczyć przez dobór punktu pracy (praca bez napięcia), fotoprąd jest sygnałem wyjściowym tzn. płynie w detektorze w odpowiedzi na oświetlenie promieniowaniem.

**C2.** Obiektem badań pracy [C2] były detektory barierowe przeznaczone do pracy bez chłodzenia kriogenicznego. Ich architekturę pokazano na rys. 2. Analizowano detektory barierowe z absorberem InAsSb o różnym domieszkowaniu: B-u (absorber niedomieszkowany), B-n (absorber typu n), B-p (absorber typu p) oraz detektor z barierą i absorberem z HgCdTe. W tej pracy pokazano metodologię wyznaczania współczynników szumów (równanie (3)) dla składowych prądu ciemnego rozpatrywanych w funkcji temperatury.



**Rys. 2.** Struktury badanych detektorów barierowych na bazie InAsSb i HgCdTe. Źródło rysunku: publikacja [C2].

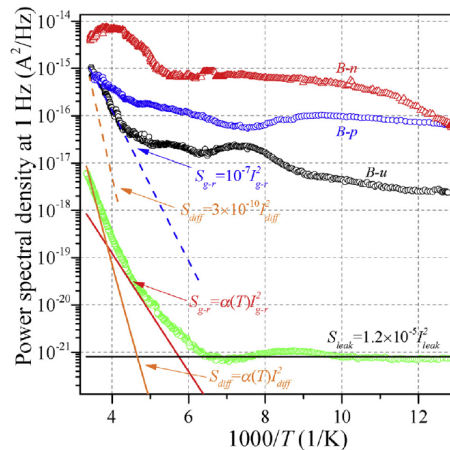
W pierwszym etapie zidentyfikowano dominujące składowe prądów poprzez modelowanie prądu zmierzonego w funkcji temperatury przy stałym napięciu w kierunku zaporowym. Zmierzone i modelowane charakterystyki pokazano na rys. 3.



**Rys. 3.** Gęstość prądu (linie ciągłe) i składniki prądu uzyskane na podstawie modelowania (linie kropkowane i przerywane) w funkcji temperatury, mierzone/obliczone przy stałym napięciu  $U = -50$  mV. Źródło rysunku: publikacja [C2].

Modelowanie zmierzonego prądu, polegające na dopasowaniu charakterystyk opisanych zależnościami teoretycznymi, prowadzono dla prądu dyfuzyjnego  $I_{diff}$  i prądu generacyjno-rekombinacyjnego  $I_{g-r}$ . Jako parametry dopasowania przyjęto czasy życia nośników  $\tau_{diff}$  i  $\tau_{g-r}$ . Pozostałych składowych prądu nie modelowano szczegółowo, lecz zidentyfikowano je zbiorczo jako słabo zależną od temperatury upływność o charakterze liniowym względem napięcia. Najprawdopodobniej składowa ta jest pochodzenia powierzchniowego, na co wskazywały pomiary prądu w funkcji stosunku obwodu do powierzchni próbki. W wyniku modelowania określono składowe  $I_{diff}(T)$  i  $I_{g-r}(T)$  i zidentyfikowano zakresy ich dominacji w funkcji temperatury. Na podstawie modelowania stwierdzono, że w zakresie niskich temperatur prądy  $I_{diff}(T)$  i  $I_{g-r}(T)$  są pomijalnie małe a

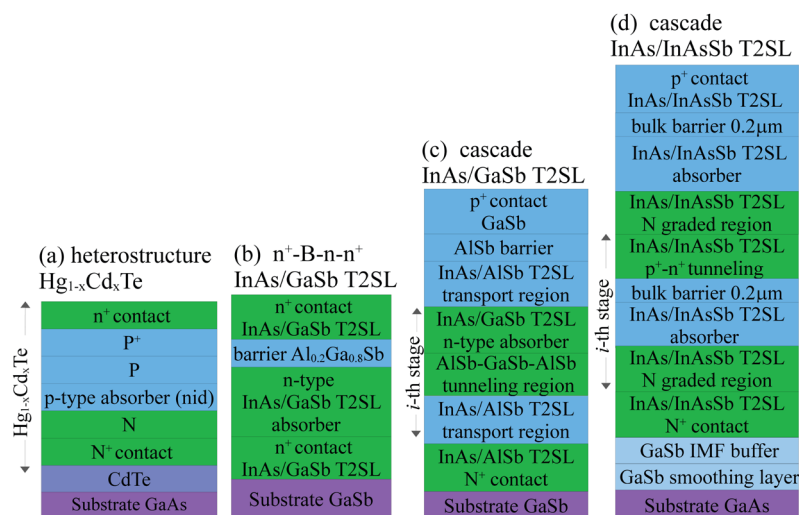
przeważa prąd upływności o słabej zależności temperaturowej,  $I \approx I_{leak}$ . Umożliwiło to wyznaczenie parametru  $\alpha_{leak}$  w funkcji temperatury z zależności  $\alpha = S_i/I^2$  w funkcji temperatury, wówczas  $\alpha \approx \alpha_{leak}$  w zakresie niskich temperatur. Dla rozważnych detektorów barierowych równanie (3) sprowadzono do postaci  $S_i(f = 1\text{ Hz}) = S_{leak} + S_{g-r} + S_{diff} = \alpha_{leak}(I_{leak})^2 + \alpha_{g-r}(I_{g-r})^2 + \alpha_{diff}(I_{diff})^2$ . W tej zależności występują tylko dwie niewiadome, gdyż składowe prądów określono w niezależnym eksperymencie, a parametr  $\alpha_{leak}$  otrzymano na podstawie analizy zależności  $\alpha = S_i/I^2$  przeprowadzonej w zakresie niskich temperatur. Brakujące parametry  $\alpha_{g-r}$  i  $\alpha_{diff}$  wyznaczono na podstawie bezpośredniego dopasowania powyższej zależności do zmierzonej gęstości widmowej mocy szumów  $S_i$  w zakresie wyższych temperatur. Na rys. 4 pokazano wyniki pomiarów gęstości widmowej mocy szumów  $S_i$  ( $f = 1$  Hz) w funkcji temperatury oraz modelowane składowe  $S_{g-r}$  i  $S_{diff}$ . Dla detektorów barierowych B-n i B-p z InAsSb, w całym rozpatrywanym zakresie temperatur, dominują szumy od upływności ( $S_{leak}$ ), ponieważ nie zaobserwowano, oczekiwanych w zakresie wysokich temperatur, istotnych zmian nachylenia charakterystyki związanych ze znacznym wzrostem składowych prądu  $I_{g-r}$  i  $I_{diff}$ . Aby wyjaśnić wzrost wartości  $S_i$  w funkcji temperatury dla detektora B-u, konieczne było uwzględnienie składowej  $S_{g-r}$  od prądu g-r z niezależnym od temperatury parametrem  $\alpha_{g-r} = 10^{-7}$ . Dla detektora HgCdTe, należy uwzględnić wszystkie trzy składowe szumu 1/f. Co więcej, parametry  $\alpha_{g-r}$  i  $\alpha_{diff}$  są w tym przypadku zależne od temperatury. Analiza zależności  $\alpha = S_i/I^2$  wykazała, że parametry  $\alpha_{g-r}$  i  $\alpha_{diff}$  dla detektora HgCdTe mają eksponencjalną zależność od temperatury, którą należy uwzględnić, aby poprawić jakość dopasowania charakterystyk.



**Rys. 4.** Gęstość widmowa mocy szumu 1/f przy  $f = 1$  Hz, mierzona dla napięcia  $U = -50$  mV w funkcji temperatury (dla wszystkich badanych struktur) oraz modelowane składowe szumu 1/f (dla detektora B-u i HgCdTe). Składowe gęstości widmowej mocy szumów dla prądu generacji-rekombinacji ( $S_{g-r}$ ), dyfuzyjnego ( $S_{diff}$ ) oznaczono liniami przerywanymi (detektor B-u InAsSb) oraz liniami ciągłymi (detektor HgCdTe). Dla detektora HgCdTe zilustrowano składową  $S_{leak}$  od upływności. Źródło rysunku: publikacja [C2].

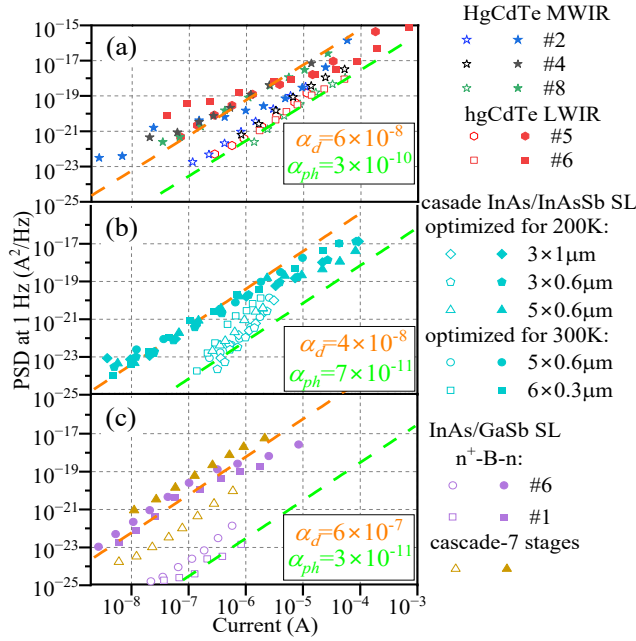
Wkładem pracy [C2] w rozwój dyscypliny AEEiTK jest przedstawienie metodologii wyznaczenia parametrów szumów w funkcji temperatury w obecności kilku składowych prądu ciemnego oraz ustalenie, że dla wszystkich detektorów prawdziwa jest zależność  $\alpha_{leak} \gg \alpha_{diff}$  i  $\alpha_{g-r}$ . Oznacza to, że upływność jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za powstanie szumu 1/f w badanych strukturach. W detektorach dobrej jakości, z niewielką upływnością, istotna jest też składowa generacyjno-rekombinacyjna.

**C3.** W pracy [C3] zbadano szumy 1/f fotoprądu w odniesieniu do szumów 1/f prądu ciemnego w różnych klasach detektorów zilustrowanych na rys. 5. Badano następujące detektory: (a) heterozłączone z HgCdTe na pasmo LWIR i MWIR, (b) barierowe z absorberem z supersieci InAs/GaSb, (c) kaskadowe z absorberem z supersieci InAs/GaSb oraz (d) kaskadowe z absorberem z supersieci InAs/InAsSb. Te ostatnie były zróżnicowane pod względem grubości i składu absorbera oraz liczby kaskad.



**Rys. 5.** Analizowane detektory: (a) HgCdTe - heterostruktura, (b) supersieć InAs/GaSb – detektor barierowy, (c) supersieć InAs/GaSb – detektor kaskadowy, (d) supersieć InAs/InAsSb – detektor kaskadowy. Źródło rysunku: publikacja [C3].

Otrzymane w dwóch osobnych eksperymentach charakterystyki gęstości widmowej mocy szumów (przy  $f = 1$  Hz) w funkcji prądu ciemnego  $I_d$  (zmienianego napięciem) i fotoprądu  $I_{ph}$  (zmienianego z wykorzystaniem ciała doskonale czarnego) pokazano na rys 6.



**Rys. 6.** Gęstość widmowa mocy szumu przy  $f = 1$  Hz, zmierzona w temperaturze  $T = 85$  K, w funkcji fotoprądu (symbole puste) i prądu ciemnego (symbole wypełnione) dla trzech grup detektorów (etykiety: a, b, c). Linie przerywane są wykresem równania  $S_i(f = 1 \text{ Hz}) = \alpha I^2 / 1 \text{ Hz}$  z parametrami  $\alpha_{ph}$  dla szumu  $1/f$  fotoprądu (kolor zielony) i dla szumu  $1/f$  prądu ciemnego (kolor pomarańczowy) wyznaczone dla najlepszego detektora w każdej grupie. Źródło rysunku: publikacja [C3].

Na ich podstawie wyznaczono parametry szumów  $\alpha_d$  i  $\alpha_{ph}$  (podane w ramkach w polu rys. 6) charakteryzujące najlepsze przyrządy z każdej grupy. Wyznaczono je jako najmniejsze wartości  $\alpha$  dopasowane do zależności zmierzonej gęstości widmowej mocy szumu w funkcji prądu opisanej relacją  $S_i(f = 1 \text{ Hz}) = \alpha I^2 / 1 \text{ Hz}$ . Szum  $1/f$  fotoprądu okazał się mierzalny we wszystkich badanych strukturach. Jednocześnie wykazano, że w każdym przypadku prąd ciemny generuje szum  $1/f$  znacznie wydajniej niż fotoprąd. Ilościowo różnice te, opisane stosunkiem współczynników  $\alpha_{ph}$  i  $\alpha_d$ , sięgają co najmniej rzędu wielkości. Najmniejszy parametr szumu  $1/f$  prądu ciemnego  $\alpha_d \approx 4 \times 10^{-8}$  uzyskano dla kaskadowych detektorów z supersieci InAs/InAsSb. Dla detektorów opartych na supersieciach parametry szumów  $1/f$  fotoprądu wynoszą  $\alpha_{ph} \approx 3 \times 10^{-11}$  (InAs/GaSb) i  $\alpha_{ph} \approx 7 \times 10^{-11}$  (InAs/InAsSb) i są nieco mniejsze niż dla detektorów HgCdTe.

Aby określić pochodzenie szumu  $1/f$  fotoprądu, w pracy [C3] zbadano jego korelacje z rezystancją  $R_0$  detektorów (przy braku napięcia) oraz szumem  $1/f$  prądu ciemnego. Wartość gęstości widmowej mocy szumu  $1/f$  fotoprądu okazała się nieskorelowana z rezystancją detektora, ale zaobserwowano monotoniczną, liniową korelację wartości gęstości widmowej mocy szumów  $1/f$  fotoprądu i prądu ciemnego, co sugeruje wspólne źródło obu szumów.

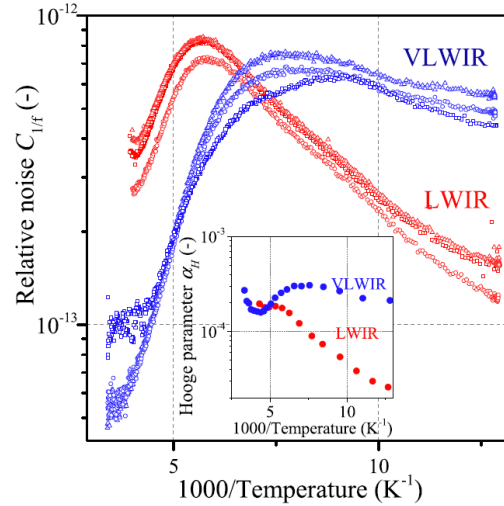
W pracy [C3] osiągnięciem stanowiącym istotny wkład w rozwój dyscypliny AEEiTK jest ilościowe zbadanie intensywności szumów  $1/f$  fotoprądu, w stosunku do szumu prądu ciemnego, w nowoczesnych detektorach podczerwieni (m.in. detektorach kaskadowych z supersieci InAs/InAsSb) oraz zaobserwowanie korelacji statystycznej sugerującej ich wspólne źródło.

#### ***Szumy $1/f$ w supersieciowych detektorach fotoprzewodzących [C4, C5]***

W literaturze niewiele uwagi poświęcono badaniom szumów małej częstotliwości detektorów fotoprzewodzących (fotorezystorów), które stanowią atrakcyjną ekonomicznie alternatywę dla droższych, lecz bardziej czułych detektorów fotowoltaicznych. W szczególności stwierdzono, że brakuje badań dotyczących szumów w przyrządach dalekiej podczerwieni opartych o supersieci InAs/GaSb i InAs/InAsSb. Prace [C4] i [C5] są pierwszymi, w których przedstawiono eksperymentalne temperaturowe zależności szumów małej częstotliwości w fotorezystorach wykonanych ze wspomnianych supersieci. Co więcej, podjęto w nich próbę wyjaśnienia charakteru obserwowanych zależności i identyfikacji mechanizmów leżących u ich podstaw.

Oba wspomniane materiały należą do konkurencyjnych rozwiązań technologicznych dla detektorów nowej generacji [48, 49]. Lepsze właściwości szumowe mogą być atutem konkretnej supersieci, dlatego rozpoznanie tej kwestii stanowiło dodatkową motywację badań.

**C4.** W pracy [C4] eksperymentalnie wykazano, że fotorezystory z supersieci InAs/InAsSb zarówno dalekiej (ang. *long wavelength infrared*, LWIR), jak i bardzo dalekiej (ang. *very long wavelength infrared*, VLWIR) podczerwieni, charakteryzują się szumami typu  $1/f$  będącymi fluktuacjami rezystancji wywołanymi fluktuacjami ruchliwości lub koncentracji nośników. W celu identyfikacji mechanizmu generowania tych fluktuacji przeprowadzono pomiary szumu  $1/f$  znormalizowanego względem napięcia  $U$ ,  $C_{1/f} = S_i(f = 1\text{Hz})/U^2$ , a także pomiary wielkości pomocniczych (ruchliwości  $\mu$  i koncentracji nośników ładunku  $n$ ) w funkcji temperatury w zakresie od 77 K do 300 K. Na ich podstawie wyznaczono parametr Hooge'a  $\alpha_H(T)$ , powszechnie stosowany do porównań intensywności szumów  $1/f$  w przyrządach i materiałach. Na rys. 7 przedstawiono zależności temperaturowe  $C_{1/f}(T)$  oraz odpowiadające im wartości  $\alpha_H(T)$ .

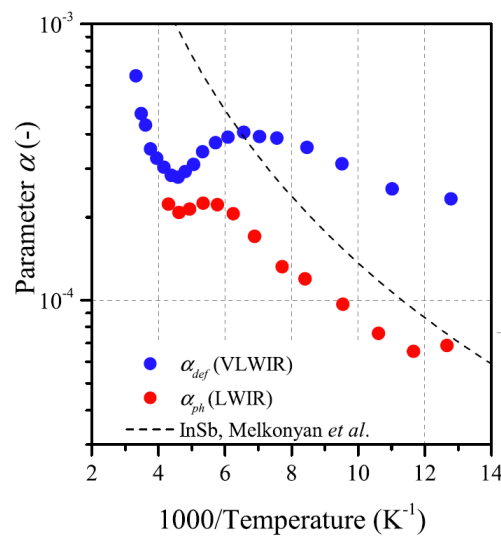


**Rys. 7.** Szum względny  $C_{1/f}$  w funkcji odwrotności temperatury zmierzony dla fotorezystorów VLWIR i LWIR (trzy próbki każdego typu). Wstawka: parametr Hooge'a w funkcji temperatury obliczony dla pojedynczej próbki każdego typu. Źródło rysunku: publikacja [C4].

Zaobserwowano, że charakter tych zależności jest złożony i różny dla detektorów LWIR oraz VLWIR. Kształt uzyskanych zależności potwierdzono dla trzech egzemplarzy przyrządów każdego typu i na tej podstawie obserwowane efekty związane z właściwościami badanej struktury, a nie np. z efektami powiązаныmi z *processingiem*. Wstępna interpretacja wyników została przeprowadzona w kontekście dwóch modeli opisujących fluktuacje rezystancji: (i) modelu fluktuacji koncentracji oraz (ii) modelu fluktuacji ruchliwości nośników. Pierwszy z nich, przewidujący zależność  $\alpha_H \sim 1/n$  parametru Hooge'a od koncentracji  $n$ , odrzucono z uwagi na brak doświadczalnego zaobserwowania takiej zależności. Dalszą analizę wyników prowadzono w oparciu o model fluktuacji ruchliwości, w którym parametr Hooge'a  $\alpha_H$  można zapisać jako:  $\alpha_H = \alpha_{H1}(\mu/\mu_1)^2 + \alpha_{H2}(\mu/\mu_2)^2$ , gdzie  $\mu$  to ruchliwość wypadkowa,  $\mu_1$  i  $\mu_2$  to jej składowe dla każdego (z dwóch rozważanych) mechanizmu rozprożeń nośników a  $\alpha_{H1}$  i  $\alpha_{H2}$  to parametry Hooge'a określające indywidualne przyczynki szumów od tych mechanizmów rozprożeń.

Składowe ruchliwości  $\mu_1(T)$  i  $\mu_2(T)$  wyznaczano na podstawie dopasowania do zmierzonej ruchliwości zastępczej (całkowitej)  $\mu(T)$  w funkcji temperatury,  $1/\mu(T) = 1/\mu_1(T) + 1/\mu_2(T)$ . Na podstawie wyznaczonych zależności temperaturowych i analizy literatury stwierdzono, że składowa o ujemnej zależności temperaturowej związana jest z rozprożeniami na fononach akustycznych  $\mu_1(T) = \mu_{ph}(T)$ , a składowa o dodatniej zależności temperaturowej związana jest z rozprożeniami na zjonizowanych domieszkach  $\mu_2(T) = \mu_{def}(T)$ . Ostatecznie model fluktuacji ruchliwości przyjął postać:  $\alpha_H = \alpha_{ph}(\mu/\mu_{ph})^2 + \alpha_{def}(\mu/\mu_{def})^2$ . Na podstawie zastępczego parametru Hooge'a  $\alpha_H(T)$  oraz wyznaczonych ruchliwości uzyskano

składowe parametry Hooge'a  $\alpha_{ph}(T)$  i  $\alpha_{def}(T)$  w funkcji temperatury (rys. 8), dopasowujące je do wyników eksperymentalnych. Na podstawie modelowania ruchliwości stwierdzono, że szum  $1/f$  związany jest z rozpraszaniem na fononach dla detektora LWIR i z rozpraszaniem na domieszkach dla detektora VLWIR. Wynika to z wag wnoszonych przez ruchliwości; w pierwszym przypadku jest  $\mu/\mu_{ph} \approx 1$ , a w drugim  $\mu/\mu_{def} \approx 1$ . Na rys. 8 zależność temperaturowa i wartości  $\alpha_{ph}$  zostały porównane z teoretycznymi obliczeniami Malkonyana i innych [50] dla materiału objętościowego InSb. W tym bez parametrycznym porównaniu uzyskano dobrą zgodność zmierzonej i teoretycznej charakterystyki temperaturowej parametru  $\alpha_{ph}(T)$ .

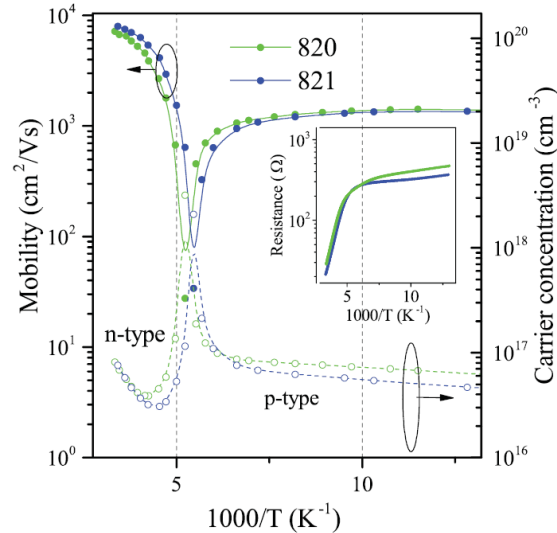


**Rys. 8.** Wyznaczone doświadczalnie parametry Hooge'a  $\alpha_{def}$  i  $\alpha_{ph}$  w funkcji odwrotności temperatury. Linia przerywana przedstawia wykres zależności teoretycznej  $\alpha_{ph}(T)$  wyznaczonej przez Melkonyana i in. [50] dla materiału objętościowego InSb. Źródło rysunku: publikacja [C4].

Znaczący wkład pracy [C4] w rozwój dyscypliny AEEiTK polega na: przedstawieniu po raz pierwszy charakterystyk szumów  $1/f$  w fotorezystorach z supersieci InAs/InAsSb dla pasma LWIR i VLWIR w szerokim zakresie temperatur oraz na zaproponowaniu ich interpretacji w oparciu o model fluktuacji ruchliwości z uwzględnieniem dwóch mechanizmów rozprożeń. Analiza ta wykazała, że w detektorach LWIR szумы  $1/f$  związane są z rozpraszaniem na fononach akustycznych, natomiast w detektorach VLWIR dominującym źródłem tych szumów jest rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach.

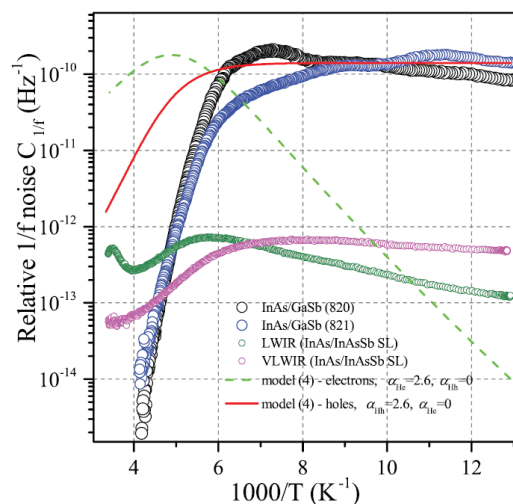
**C5.** W pracy [C5] zbadano szумы  $1/f$  fotorezystorów z supersieci InAs/GaSb na pasmo LWIR w kontekście wpływu zmiany typu przewodnictwa z dziurowego (typ p), występującego w niskich temperaturach, na elektronowy (typ n) - pojawiający się w wyższych temperaturach. Pomiarы ruchliwości i koncentracji w funkcji temperatury, pokazane na rys. 9, dla dwóch

różnych struktur (z dwóch procesów wzrostu 820 i 821) potwierdziły obecność zmiany typu przewodnictwa, obserwowanego kilkakrotnie w literaturze [51-53]. Zmiana typu przewodnictwa występuje dla  $T \approx 190$  K i jest efektem powtarzalnym obserwowanym dla dwóch fotodetektorów (820, 821).



**Rys. 9.** Ruchliwość Halla i koncentracja nośników w funkcji odwrotności temperatury dla supersieci InAs/GaSb z których wytworzono fotorezystory 820 i 821. We wstawce rysunku pokazano rezystancje tych fotorezystorów w funkcji temperatury. Źródło rysunku: publikacja [C5].

Zaobserwowaną zmianę typu przewodnictwa powiązano z pomiarami znormalizowanych szumów  $1/f$ :  $C_{1/f} = S_U(f = 1 \text{ Hz})/U^2$  w funkcji temperatury, które pokazano na rys. 10. Na tym samym rysunku zamieszczono również charakterystyki dla fotorezystorów z supersieci InAs/InAsSb zmierzone w pracy [C4].



**Rys. 10.** Względny szum  $1/f$  w funkcji odwrotności temperatury dla fotorezystorów z supersieci InAs/GaSb i InAs/InAsSb. Dane dla supersieci InAs/InAsSb pochodzą z pracy [C4]. Wyniki dopasowania opracowanego modelu wykreślono linią ciągłą (składnik od dziur) i linią przerywaną (hipotetyczny, nieobecny składnik od elektronów). Źródło rysunku: publikacja [C5].

Zauważono, że szum 1/f dla detektorów z supersieci InAs/GaSb jest znaczny w niższych temperaturach, ale znacznie maleje w funkcji temperatury i staje się niemierzalny w zakresie wysokich temperatur (ang. *High Operating Temperature*, HOT). Uznano to za istotną zaletę tych supersieci, wobec małych, ale ciągle mierzalnych szumów 1/f dla supersieci InAs/InAsSb w zakresie HOT. Zaobserwowaną charakterystykę temperaturową szumu 1/f da się w pewnym stopniu wyjaśnić zmianą typu przewodnictwa. W ogólnym przypadku kanały przewodnictwa wnoszą ważony wkład w całkowity względny szum 1/f:

$$C_{1/f}(1 \text{ Hz}) = \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_e + \sigma_h} \right)^2 \frac{\alpha_{He}}{N} + \left( \frac{\sigma_h}{\sigma_e + \sigma_h} \right)^2 \frac{\alpha_{Hh}}{P},$$

gdzie  $\sigma_h$  i  $\sigma_e$  to przewodność dziur i elektronów,  $P$  to

liczba dziur,  $N$  to liczba elektronów w objętości próbki, a  $\alpha_{He}$  i  $\alpha_{Hh}$  to parametry Hooge'a określające intensywność szumów 1/f. Szumy 1/f od dwóch typów (dwóch kanałów) przewodnictwa są więc ważone kwadratami względnych udziałów przewodności danego typu w całkowitej przewodności próbki. Powyższy model zastosowano do analizy wyników, aby sprawdzić, w jakim stopniu zależność temperaturowa składników przewodności supersieci kształtuje zależność temperaturową szumu 1/f. Przewodność supersieci domieszkowanej na typ p, niezbędną do wyliczenia wag dla kanałów przewodności, wyznaczono z zależności  $\sigma = \sigma_h + \sigma_e = e(\mu_h p + \mu_e n_i^2 / p)$ , gdzie  $n_i$  jest koncentracją samoistną nośników. Ruchliwości  $\mu_h$  i  $\mu_e$  oraz koncentrację  $p$  w funkcji temperatury przyjęto z pomiarów zjawiska Halla. Koncentrację samoistną nośników w supersieci obliczono stosując relacje jak dla materiałów objętościowych, ale niezbędne w tych obliczeniach parametry wyznaczono z pomiarów krawędzi absorpcji (przerwa energetyczna) lub pozyskano z literatury (masy efektywne nośników). Parametrami dopasowania modelu szumu 1/f do danych z rys. 10 były, niezależne od temperatury, parametry Hooge'a  $\alpha_{He}$  i  $\alpha_{Hh}$  dla dziur i elektronów. Modelowanie wykazało, że obserwowany spadek wartości znormalizowanego szumu 1/f, poniżej poziomu szumu tła systemu pomiarowego, jest w dużej mierze konsekwencją zmian udziału przewodności dziurowej w całkowitej przewodności próbki. Drugim, dodatkowym czynnikiem może być malejąca zależność  $\alpha_{He}$  w funkcji temperatury, która pozwoliłaby uzyskać pełną zgodność modelu i eksperymentu. Co ważne, model wyklucza obecność szumu 1/f od kanału przewodności elektronów i sugeruje obecność tylko szumu 1/f od przewodności dziur z parametrem Hooge  $\alpha_{Hh} = 2,6$ . Niezerowa wartość parametru  $\alpha_{He}$  związanego z przewodnością elektronów powodowałaby nieobserwowany empirycznie wzrost szumu 1/f w funkcji temperatury w zakresie HOT. Ten hipotetyczny składnik od przewodnictw elektronów zilustrowano na rys. 10.

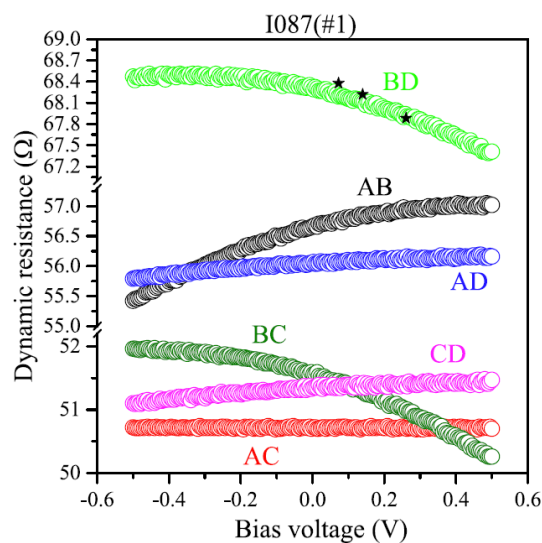
W pracy [C5] znaczący wkład w rozwój dyscypliny AEEiTK polega na: (i) wykazaniu, że szum  $1/f$  w fotorezystorach z supersieci InAs/GaSb jest konsekwencją fluktuacji przewodności dziur a nie elektronów nawet gdy w całkowitym przewodnictwie przeważa składowa od elektronów; (ii) opracowaniu modelu szumu  $1/f$  dla fotodetektora z supersieci InAs/GaSb z uwzględnieniem dwóch kanałów przewodnictwa funkcji temperatury; (iii) porównaniu szumów  $1/f$  fotorezystorów z konkurencyjnych supersieci InAs/GaSb i InAs/InAsSb, które w zakresie HOT faworyzuje fotorezystory wykonane z InAs/GaSb.

### **Szumy małej częstotliwości jako miara jakości kontaktów i materiałów dla detekcji podczerwieni [C6-C9]**

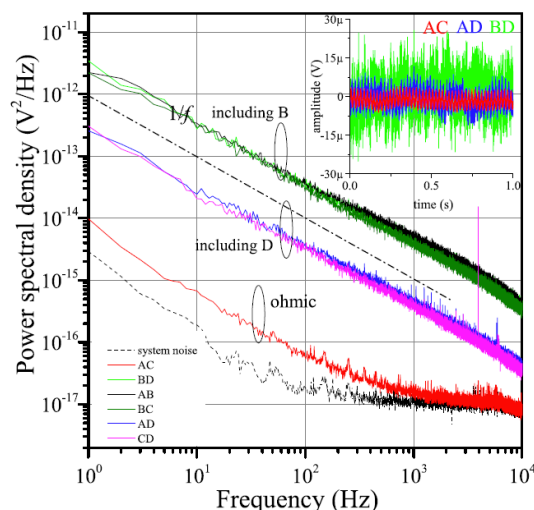
Jak wspomniano we wstępie, intensywność szumów małej częstotliwości jest powszechnie uznawana za wskaźnik jakości przyrządów, struktur półprzewodnikowych i samych materiałów. Podjęto ten wątek w prowadzonych badaniach koncentrując się na: zależności między nieliniowością kontaktów a szumem  $1/f$  [C6], metodzie identyfikacji szumów od kontaktów i objętości z zastosowaniem funkcji koherencji [C7], charakteryzacji szumów  $1/f$  od objętości materiału z wykorzystaniem czterokontaktowej techniki pomiarowej [C8] oraz na wyznaczeniu parametrów defektów w absorberze detektorów fotowoltaicznych za pomocą spektroskopii szumowej [C9]. W pracach [C6-C8] wykorzystano specjalne wielokontaktowe struktury testowe wykonane z materiałów GaAs, GaSb i InAs, które są wszechstronnie wykorzystywane w detektorach podczerwieni jako np. warstwy buforowe, kontaktowe lub absorbery [54]. Choć w części eksperymentalnej prac [C6-C9] zawężono się do badania materiałów stosowanych w detektorach podczerwieni, to opracowane metody analizy nie ograniczają się do tej jednej grupy materiałów.

**C6.** Obiektem badań w pracy [C6] były struktury van der Pauwa wytworzone z arsenku galu (GaAs) z czterema kontaktami indowymi (oznaczone A, B, C, D). Ind jest stosowany jako materiał do wytworzenia kontaktów np. w matrycach podczerwieni [55]. Celem pracy było zbadanie w sposób ilościowy związku szumu  $1/f$  i nieliniowości charakterystyk prądowo-napięciowych tych struktur. Oceny nieliniowości tych charakterystyk dokonano na podstawie pomiarów rezystancji dynamicznej  $R(U_B)$  w funkcji napięcia  $U_B$ . Dla liniowych charakterystyk prądowo-napięciowych rezystancja dynamiczna pozostaje stała  $R(U_B) = \text{const}$ . Przeprowadzone badania wstępne wskazywały na występowanie zależności między szumami  $1/f$  a charakterystykami  $I-U_B$  mierzonymi pomiędzy kontaktami tej samej struktury. Przykładem jest próbka I087(#1), dla której na rys. 11 pokazano wszystkie sześć par charakterystyk rezystancji dynamicznej  $R(U_B)$ . Pomiary szumów  $1/f$  na tych samych parach

kontaktów (rys. 12) wykazały, że znaczne szумы  $1/f$  występują dla charakterystyk nieliniowych i bardzo małe (bliskie szumu tła układu pomiarowego) dla pary o liniowej charakterystyce  $I-U_B$ , odpowiadającej stałej rezystancji  $R$  obserwowanej w pomiarach. Zróżnicowanie charakterystyk, konieczne do badań ilościowych, uzyskano poprzez intencjonalną zmianę koncentracji i typu domieszki w materiale GaAs. Zakres zmian koncentracji dla typu p obejmował:  $2,6 \times 10^{16} - 6,6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , dla typu n:  $2,6 \times 10^{16} - 6,6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Dodatkowo kontakty uformowano w dwóch różnych laboratoriach (Uniwersytet Rzeszowski i Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki – Sieć Badawcza Łukasiewicz), stosując odmienne procedury wygrzewania, co wprowadzało dalsze zróżnicowanie charakterystyk.



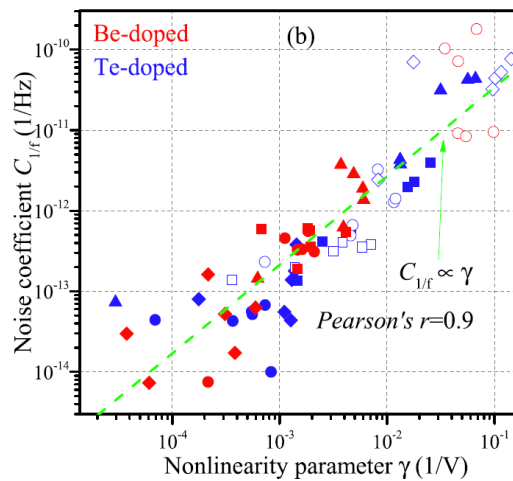
**Rys. 11.** Rezystancja dynamiczna w funkcji napięcia polaryzacji zmierzona pomiędzy sześcioma parami kontaktów struktury I087(#1). Źródło rysunku: publikacja [C6].



**Rys. 12.** Gęstości widmowe mocy szumu małej częstotliwości zmierzone na kontaktach struktury I087(#1). Wstawka: znormalizowane przebiegi szumu zarejestrowane na parach kontaktów AC, AD i BD. Źródło rysunku: publikacja [C6].

Dla wszystkich struktur zmierzono koncentrację i wyznaczono typ dominujących nośników prądu, a następnie zmierzono szumy małej częstotliwości dla sześciu par każdej struktury pozostającej w temperaturze pokojowej. Charakterystyki mierzone dla sześciu par kontaktów tej samej struktury były zawsze w różnym stopniu nieliniowe. Na tej podstawie nieliniowość związano z kontaktami (interfejsem metal-półprzewodnik), a nie z nieliniowym charakterem przewodności objętości materiału. Kontakty nieliniowe posiadały w przybliżeniu liniową zależność rezystancji dynamicznej od napięcia, którą opisano zależnością:  $R(U_B)=R(U_B=0)\times(1+\alpha_1/2U_B)$ , gdzie  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  to stałe współczynniki, określone dla ujemnego i dodatniego napięcia z osobna. Zdefiniowano parametr  $\gamma=|\alpha_1|+|\alpha_2|$ , będący miarą nieliniowości kontaktów.

Zależność znormalizowanego szumu 1/f od współczynnika nieliniowości  $\gamma$  dla serii próbek pokazano na rys. 13.



**Rys. 13.** Znormalizowany szum 1/f w funkcji parametru nieliniowości zmierzony dla różnych par kontaktów struktur GaAs (domieszkowanego w różnym stopniu tellurem - typ n lub berylem - typ p). Zielona linia określa zależność liniową ze współczynnikiem korelacji Pearsona  $r=0,9$ . Źródło rysunku: publikacja [C6].

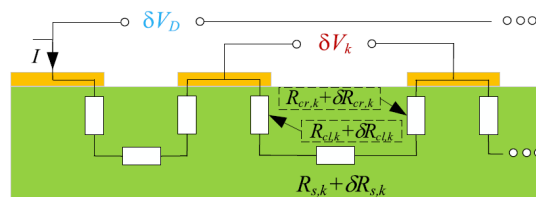
Uzyskano silną korelację liniową ze współczynnikiem korelacji Pearsona  $r = 0,9$ . Co oznacza, że kontakty liniowe charakteryzowały się niskim poziomem szumu 1/f, a kontakty nieliniowe – wysokim. Koncentracja i typ domieszki oraz procedura formowania kontaktów kształtowały jedynie stopień nieliniowości kontaktu, pozostając bez wyraźnego, bezpośredniego wpływu na szum 1/f.

W pracy [C6] zbadano również wpływ temperatury na nieliniowość wybranych kontaktów i ich szumy 1/f. Potwierdzono, że dla słabo domieszkowanych próbek GaAs typu p niska temperatura ( $T = 85$  K) znacząco zwiększa nieliniowość. Zmierzony w tych warunkach szum 1/f był o kilka rzędów większy niż w temperaturze pokojowej dla tych samych kontaktów,

w której wykazywały one mniejszą nieliniowość. W ten sposób wykazano, że temperatura wpływa na mechanizmy transportu kontaktu metal-półprzewodnik, a te kształtują ich charakterystyki i szumy 1/f.

Znaczący wkład pracy [C6] 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. Potwierdzono, że szumy 1/f stanowią czułe narzędzie oceny jakości kontaktów – nawet niewielka nieliniowość prowadzi do istotnego wzrostu obserwowanych szumów. Ważne z punktu widzenia aplikacji staje się unikanie nieliniowości, aby minimalizować generowanie szumów 1/f na interfejsach metal-półprzewodnik.

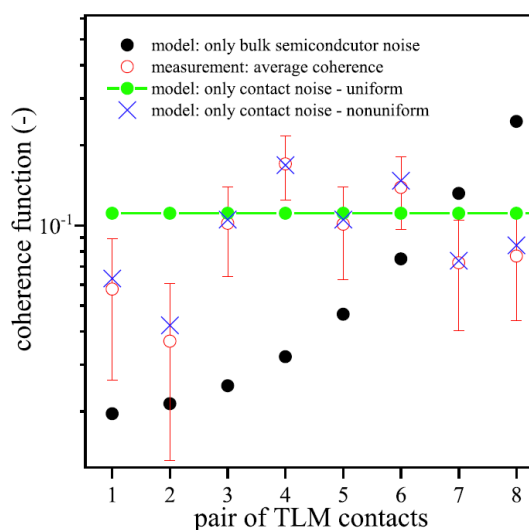
C7. Praca [C6] pokazała, że istotnym problemem w analizie szumów 1/f jest identyfikacja składowych szumu pochodzących od kontaktów metal-półprzewodnik i objętości materiału. W literaturze opisano metody tej identyfikacji, które bazują na pomiarze gęstości widmowej mocy i analizie jej skalowania z rozmiarem przyrządu, zwykle z długością [56]. W pracy [C7] po raz pierwszy wykorzystano do tego celu funkcję koherencji, służącą do wykrywania liniowej zależności pomiędzy dwoma sygnałami. Metodę opracowano dla struktur testowych typu TLM (ang. *Transmission-Line-Method*), posiadających wiele kontaktów elektrycznych rozmieszczonych w różnej odległości. Model szumowy TLM oraz rozważane teoretycznie a następnie eksperymentalnie sygnały szumowe  $\delta V_D$  (między pierwszym i ostatnim kontaktem) i  $\delta V_k$  (dla  $k$ -tej pary kontaktów) pokazano na rys. 14. W zaproponowanym modelu teoretycznym przyjęto, że źródłem szumów 1/f mogą być wyłącznie kontakty – traktowane jako jednorodne lub niejednorodne źródła szumu – albo objętość materiału.



**Rys. 14.** Model szumowy struktury TLM i schemat pomiarowy funkcji koherencji napięć  $\delta V_D$  i  $\delta V_k$ . Źródło rysunku: publikacja [C7].

Istotne jest, że obliczenie wartości teoretycznych przy założeniu, że źródłem szumu 1/f są jednorodne kontakty albo objętość materiału wymaga jedynie znajomości wymiarów struktury (długości) oraz liczby kontaktów i nie zawiera żadnych parametrów dopasowania. W przypadku modelu z niejednorodnymi kontaktami należy dodatkowo określić względne

relacje między szumami par kontaktów i zastosować samouzgodnioną procedurę dopasowania modelu i danych. Korzystając z wyprowadzonych zależności teoretycznych, obliczono przewidywane wartości funkcji koherencji dla różnych par kontaktów struktury testowej TLM wykonanej z arsenku indu (InAs) typu p, z kontaktami ze złota (Au). Na rys. 15 przedstawiono porównanie zmierzonych (wartość średnia w paśmie) i teoretycznych wartości funkcji koherencji w funkcji numeru pary kontaktów. Wartości teoretyczne otrzymano za pomocą trzech modeli zakładających, że wyłącznym źródłem szumów są kontakty (stanowiące jednorodne albo niejednorodne źródła szumów) albo objętość materiału.



**Rys. 15.** Zmierzona (kolor czerwony) i obliczona wartość funkcji koherencji dla par kontaktów struktury testowej TLM. Obliczenia wykonano przy założeniach, że występuje wyłącznie: (a) szum objętościowy materiału (kolor czarny), (b) szum kontaktów (identyczny wkład od każdego kontaktu – kolor zielony), (c) szum kontaktów (różny, indywidualny wkład każdej pary kontaktów – kolor niebieski). Źródło rysunku: publikacja [C7].

Wyniki uzyskane dla warstwy InAs typu p wykazały dominację szumu kontaktów o niejednorodnej intensywności dla poszczególnych par.

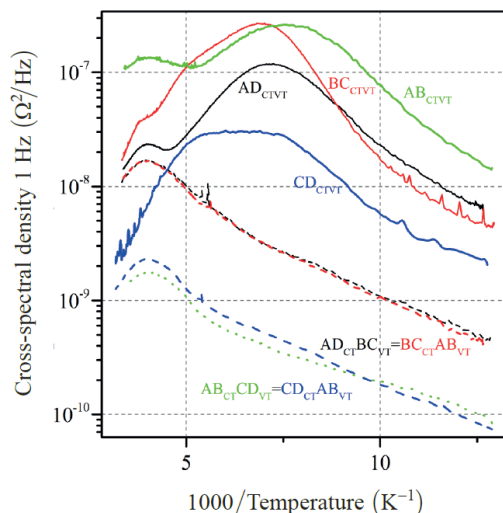
Znaczący wkład artykułu [C7] w rozwój dyscypliny AEEiTK polega na zaprezentowaniu zastosowania funkcji koherencji do identyfikacji źródeł szumu 1/f (kontakty a objętość materiału) w planarnej strukturze półprzewodnikowej z wieloma kontaktami (struktura TLM), w tym na opracowaniu modelu teoretycznego oraz jego weryfikacji eksperymentalnej.

**C8.** Jak wynika z prac [C6, C7], identyfikacja szumów 1/f przypisywanych właściwościom materiału jest utrudniona z uwagi na obecność szumów kontaktów. Zaobserwowanie szumów będących właściwościami materiału (a nie kontaktów) wymaga stosowania odpowiednich technik pomiarowych. Jedną z takich metod, którą można zastosować do cienkich warstw wytworzonych metodami epitaksji, pokazali Vandamme i inni

[57]. Polega ona na zasilaniu próbki prądem  $I$  (przez kontakty prądowe) i pomiarze fluktuacji napięcia na odrębnych kontaktach napięciowych. Wówczas całkowita znormalizowana gęstość widmowa mocy szumów na kontaktach napięciowych wyraża się zależnością:  $S_V / I^2 = \sum_{\alpha} (i_{\alpha} j_{\alpha})^2 S_{\alpha} / I^4$ , gdzie  $\alpha$  jest indeksem gałęzi sieci rezystorowej modelującej przewodzenie warstwy epitaksjalnej. Z zależności tej wynika, że w całkowitej mierzonej gęstości widmowej mocy szumów  $S_V$  udział lokalnego źródła szumów rezystancji o gęstości widmowej mocy  $S_{\alpha}$  jest ważony współczynnikiem wynikającym z rozplywu prądów  $i_{\alpha}$  i  $j_{\alpha}$  w sieci rezystorowej w obwodzie oryginalnym i obwodzie dołączonym (w którym role kontaktów prądowych i napięciowych są zamienione). Ta metoda pomiaru ma kilka istotnych cech z punktu widzenia określania źródeł szumów. Różnicowy charakter prowadzonych pomiarów na kontaktach napięciowych sprawia, że fluktuacje o charakterze wspólnym, pojawiające się na kontaktach, powinny być tłumione. Dodatkowo, przy zamianie roli kontaktów, szum zmierzony na kontaktach napięciowych powinien być identyczny, jeśli jest on wynikiem fluktuacji rezystancji związanej z objętością materiału – co stanowi sposób identyfikacji niedostatecznie tłumionych szumów kontaktowych.

W pracy [C8] zademonstrowano zastosowanie powyższej metody do identyfikacji rezystancyjnych szumów  $1/f$  występujących w objętości warstw epitaksjalnych GaSb typu p i typu n o różnym poziomie domieszkowania. Numerycznie wyznaczono rozkład wzmocnienia szumowego  $(i_{\alpha} j_{\alpha})^2 / I^4$  dla badanego kształtu próbki i położenia kontaktów, dla różnych konfiguracji zasilania. Pokazano, że w pomiarach dwukontaktowych, prowadzonych wyłącznie na kontaktach prądowych, wzmocnienie szumowe, określające przestrzenny wkład źródeł szumów  $1/f$  w całkowity szum, jest bardzo duże w obszarach przy tych kontaktach. Natomiast w pomiarach czterokontaktowych rozkład wzmocnienia szumowego jest bardziej równomierny – wówczas próbkowane są właściwości szumowe objętości/warstwy materiału. W części eksperymentalnej pokazano, że intensywność szumów  $1/f$  zmierzona metodą dwukontaktową różni się dla poszczególnych par tych kontaktów, niezależnie od typu przewodnictwa i domieszkowania warstwy GaSb, co wskazuje na ich kontaktowe pochodzenie. Zagadnienie zilustrowano na rys. 16 dla warstwy GaSb typ n, gdzie charakterystyki  $AD_{CTVT}$ ,  $BC_{CTVT}$ ,  $AB_{CTVT}$ ,  $CD_{CTVT}$  to gęstości widmowe mocy szumów  $S_R(f=1 \text{ Hz})$  otrzymane w standardowych pomiarach dwukontaktowych. Czterokontaktowa metoda pomiaru pokazuje, że pomiar szumów na zaciskach napięciowych, np. BC przy zasilaniu próbki prądem z zacisków AD, daje taki sam poziom szumu co pomiar w sytuacji odwrotnej (tj. zasilania z kontaktów BC i pomiaru szumu na kontaktach AD). To oznacza, że w tym przypadku mierzony szum  $1/f$  pochodzi od

fluktuacji rezystancji objętości materiału. Dla warstw GaSb typu n i silnie domieszkowanej warstwy GaSb typu p, spełniających tę „zasadę odwrotności” (ang. *reciprocity rule*), wyznaczono względny poziom szumu  $1/f$ , który można utożsamiać z właściwościami materiału. Dla GaSb typu n był on kilka rzędów wielkości większy niż dla GaSb typu p.



**Rys.16.** Wzajemna gęstość widmowa  $S_R = S_V/I^2/f$  dla  $f = 1$  Hz zmierzona w funkcji temperatury dla różnych konfiguracji zacisków prądowych (oznaczenie CT) i napięciowych (oznaczenie VT) dla n-GaSb domieszkowanego  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Notacja  $XY_{CTVT}$  oznacza dwukontaktowy pomiar szumów na kontaktach o etykiecie XY, notacja  $WX_{CT}YZ_{VT}$  oznacza czteropunktowy pomiar szumów tj. zasilanie prądowe na kontaktach WX a pomiar napięcia szumów na kontaktach YZ. Źródło rysunku: publikacja [C8].

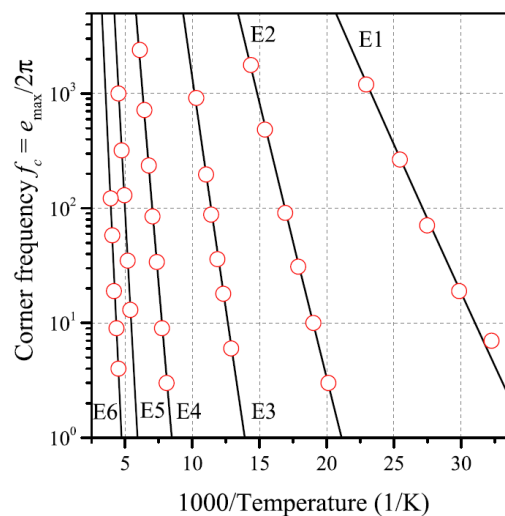
Znaczący wkład w rozwój dyscypliny AEEiT K w artykule [C8] polega na eksperymentalnym zademonstrowaniu użyteczności czteropunktowej metody pomiaru szumów do wyznaczenia właściwości szumowych (szumy małej częstotliwości) objętości materiału na przykładzie warstw GaSb.

**C9.** Koncentracja i poziomy energetyczne defektów stanowią istotną informację o jakości materiałów półprzewodnikowych. W dziedzinie detekcji promieniowania wiedza ta nie jest mniej istotna, ponieważ poziom energetyczny defektu może znajdować się w pobliżu środka przerwy energetycznej i wówczas staje się wydajnym centrum generacji-rekombinacji. Takie centrum redukuje czas życia nośników [58, 59] i jest przyczyną powstawania nadmiarowych prądów ciemnych np. generacyjno-rekombinacyjnego i tunelowego [60]. Co więcej, parametry defektów wyznaczone eksperymentalnie mogą być wykorzystane jako dane wejściowe do modelowania/symulacji detektorów w procesie projektowania optymalnej architektury przyrządu. W identyfikacji parametrów defektów, wśród metod bazujących na pomiarach wielkości elektrycznych, standardem jest stosowanie metody pojemnościowej spektroskopii głębokich poziomów pułpkowych (ang. *Deep Level Transient Spectroscopy*,

DLTS) [61]. Mniej znaną alternatywą dla DLTS jest metoda bazująca na pomiarze szumu zwana spektroskopią szumową (ang. *Low frequency Noise Spectroscopy*, LFNS) mająca kilka zalet w stosunku do techniki pojemnościowej np.: nie wymaga dedykowanej struktury ze złączem, jest stacjonarna względem pobudzenia (pomiar przy stałym napięciu), nie wymaga stosowania pobudzenia o dużej amplitudzie. Metoda szumowa daje jednak zwykle wyniki bardziej wymagające pod względem interpretacji, ponieważ sygnał szumowy pochodzi z całego przyrządu, a nie jak w technice DLTS - tylko z pewnego obszaru warstwy zubożonej. Metodę LFNS z sukcesem wykorzystano, w ramach wcześniej prowadzonych badań, do identyfikacji defektów w HgCdTe [28] i w supersieci InAs/GaSb [62].

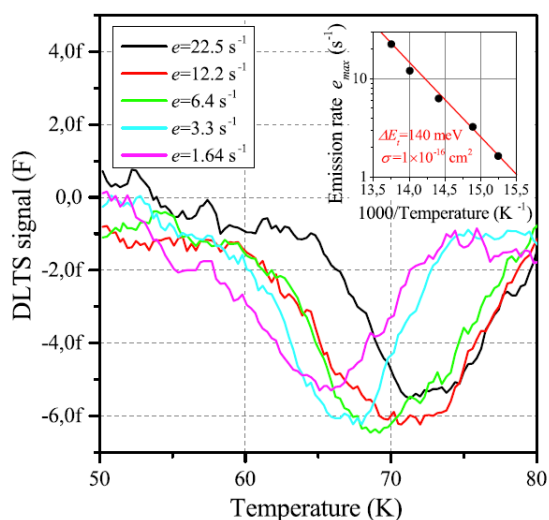
W artykule [C9] zastosowano spektroskopię szumową do identyfikacji poziomów defektowych w materiale trójskładnikowym  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Jest to materiał ważny w detekcji podczerwieni, wykorzystywany jako objętościowy absorber [63] lub jako składnik supersieci InAs/InAsSb [64]. Badania przeprowadzono dla heterozłączonego detektora podczerwieni z absorberem ze związku trójskładnikowego  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x=0,18$ ) optymalizowanego na średnią podczerwień za pomocą składu ( $x$ ).

W publikacji [C9] opisano technikę spektroskopii szumowej, która polega 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 pałpkowym, związanym z defektem, a pasmem walencyjnym lub przewodnictwa na podstawie teorii Shockleya-Reada-Halla. Stosując metodę LFNS zidentyfikowano sześć takich procesów a zależność temperaturową ich częstotliwości charakterystycznych pokazano na rys. 17 w postaci wykresów Arrheniusa.



**Rys. 17.** Zależność częstotliwości charakterystycznych w funkcji temperatury dla procesów generacji-rekombinacji obserwowanych w zmierzonej gęstości widmowej mocy szumów. Źródło rysunku: publikacja [C9].

Wyznaczone energie aktywacji: 45 meV, 85 meV, 145 meV, 250 meV, 390 meV i 460 meV poddano analizie pod kątem identyfikacji typu pułapki oraz miejsca występowania defektu w strukturze przyrządu. Energie aktywacji bliskie bądź większe niż przerwa energetyczna materiału absorbera ( $E_g \approx 270$  meV) utożsamiono z pułapkami w barierze elektronowej AlSb o szerszej niż absorber przerwie energetycznej. Trzy najmniejsze energie związane z poziomami energetycznymi defektu w materiale  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , przy czym poziomy 45 meV i 145 meV przypisano pułapkom dziurowym, a poziom 85 meV - pułapce elektronowej. Znalezione poziomy energetyczne względem krawędzi pasma walencyjnego wraz z ich kwalifikacją (pułapki dziurowe lub elektronowe) pokazano w tabeli 2. Zebrane dane eksperymentalne dobrze zgadzają się z podawanymi w literaturze obliczeniami teoretycznymi dla defektów punktowych. Dodatkową wartość pracy [C9] stanowi porównanie otrzymanych poziomów energetycznych defektów z wynikami uzyskanymi techniką DLTS, której zastosowanie dla przyrządów z wąską przerwą energetyczną nie jest częste. Otrzymany w pomiarach sygnał DLTS w funkcji temperatury pokazano na rys. 18, a we wstawce tego rysunku wyznaczono energię aktywacji defektu (poziom pułapkowy) z wykresu Arrheniusa dla częstości emisji  $e_{max}$  z tej pułapki. Metodą DLTS wykryto poziom pułapkowy o energii  $E_t = 140$  meV zgodny z tym otrzymanym metodą LFNS. Poziomy pułapkowe o energii  $E_t \approx 140$  meV i  $E_t = 45$  meV, w odniesieniu do krawędzi pasma walencyjnego, są zlokalizowane blisko środka przerwy energetycznej, odpowiednio w InAsSb dla zakresu średniofalowego (140 meV) oraz długofalowego (45 meV). Mogą tym samym stanowić efektywne centra generacji-rekombinacji ograniczające wydajność detektorów.



**Rys. 19.** Sygnał DLTS w funkcji temperatury dla różnych szybkości emisji  $e$  z pułapki. Wstawka rysunku przedstawia wykres Arrheniusa dla lokalnego ekstremum  $e_{max}$  i wyznaczoną energię aktywacji defektu/pułapki. Źródło rysunku: publikacja [C9].

**Tabela 2.** Poziomy energetyczne defektów (rozpatrywanych jako pułapka dziurowa/elektronowa) znalezione metodą LFNS oraz wartości obliczone [65] dla samoistnych defektów punktowych w InAsSb. Wartości energii podano względem krawędzi pasma walencyjnego.

$\Delta E_t$ (meV) (considered as a hole trap)	$E_g - \Delta E_t$ (meV) (considered as an electron trap)	$E_t$ (meV)
45	228	60
85	188	180
140	130	120
LFNS experiment		From [26]

Znaczący wkład w rozwój dyscypliny AEEiTK w artykule [C9] polega na wyznaczeniu poziomów energetycznych defektów w materiale trójskładnikowym InAsSb za pomocą spektroskopii szumowej (LFNS) i metody pojemnościowej (DLTS).

### Wnioski

Publikacje cyklu nie ograniczają się wyłącznie do raportowania eksperymentalnych parametrów szumowych badanych struktur. Wyniki doświadczalne stanowiły punkt wyjścia do szerszej analizy mechanizmów powstawania szumów uzupełnionej opracowaniem modeli wyjaśniających zmierzone charakterystyki. Przedmiotem badań cyklu publikacji są nowoczesne rozwiązania przyrządowe i materiałowe (ang. *state-of-the-art*) w zakresie detekcji podczerwieni. Choć nie stanowi to wkładu habilitanta, to powoduje, że zagadnienia poruszane w cyklu pozostają aktualne i atrakcyjne z poznawczego oraz aplikacyjnego punktu widzenia. W porównaniu z badaniami prowadzonymi przed uzyskaniem stopnia doktora, w pracach stanowiących cykl skoncentrowano się na pomiarze, analizie i interpretacji zjawiska szumów małej częstotliwości w dotąd nierozpatrywanych klasach materiałów (supersieci InAs/InAsSb), nowych strukturach detekcyjnych (m.in. detektorach kaskadowych), odmiennych typach detektorów (fotorezystorach), a także na materiałach objętościowych (InAs, GaSb, GaAs, InAsSb) wykorzystywanych w procesie wytwarzania detektorów. Stąd prace te, zebrane razem w formie cyklu, tworzą istotne osiągnięcie naukowe dotyczące zagadnienia szumów małej częstotliwości w nowoczesnych przyrządach i materiałach dla detekcji podczerwieni.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Przed uzyskaniem stopnia doktora odbyłem krótką, kilkudniową wizytę badawczą w Instytucie Technologii Elektronowej (grupa prof. M. Bugajskiego i dr hab. A. Jasik) zajmującej się wytwarzaniem i charakteryzacją kwantowych laserów kaskadowych i detektorów podczerwieni.

W okresie od 1.02.2025 r. do 30.04.2025 r. (3 miesiące) odbyłem staż naukowy w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego (ZFCS) na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) im. J. Dąbrowskiego w Warszawie. Celem stażu było podniesienie kompetencji w zakresie zaawansowanych metod charakteryzacji elektrycznej materiałów i przyrządów półprzewodnikowych, w szczególności stosowanych w detekcji promieniowania podczerwonego. Metody te obejmowały charakteryzację eksperymentalną dotyczącą pomiarów szumów elektrycznych wielkich częstotliwości a także ruchliwości i koncentracji nośników. Drugim celem stażu było zapoznanie się z potrzebami ZFCS WAT w zakresie modelowania transportu nośników prądu. Jako uczestnik stażu zaproponowałem dostosowanie własnych narzędzi obliczeniowych do modelowania transportu elektronicznego i wykonanie obliczeń dla materiałów badanych w ZFCS WAT.

W 2019 r., w ramach konsorcjum złożonego z Politechniki Rzeszowskiej, Wojskowej Akademii Technicznej, Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki oraz firmy VIGO Photonics (wtedy VIGO System) realizowałem projekt TECHMATSTRATEG1/347751/5/NCBR/2017 pt. „Technologie materiałów i struktur dla detekcji długofalowego promieniowania podczerwonego (LWIR)”, zadanie nr 3 pt. „Wzrost epitaksjalny, obróbka technologiczna (w tym montaż końcowy) i charakteryzacja złożonych heterostruktur przyrządowych”. Pełniłem rolę wykonawcy odpowiedzialnego za charakteryzację szumową wytworzonych struktur, w tym detektorów podczerwieni. W wyniku realizacji projektu powstały prace [C4, C5, C8].

Swoją aktywność naukową od początku prowadzenia badań realizowałem we współpracy z innymi ośrodkami naukowymi. Jest to podyktowane charakterem prowadzonych badań i zakresem obranej specjalizacji naukowej, które nie obejmują wytwarzania struktur. Działalność naukową w innych ośrodkach uznaję za istotną, ponieważ jej owocem były liczne publikacje naukowe w prestiżowych czasopiśmie, afiliowane ze współautorami z innych jednostek naukowych:

- Wojskowa Akademia Techniczna im. J. Dąbrowskiego: 8 wspólnych publikacji,

- Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki – Sieć Badawcza Łukasiewicz (dawniej Instytut Technologii Elektronowej - ITE i Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych - ITME): 6 wspólnych publikacji,
- Uniwersytet Rzeszowski: 2 wspólne publikacje,
- Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk (IFPAN): 1 wspólna publikacja,
- Politechnika Wroclawska: 1 wspólna publikacja,
- University of New Mexico, Albuquerque (USA): 1 wspólna publikacja.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

### 6.1 Osiągnięcia organizacyjne

- Organizuję pracę laboratoriów pomiarów szumów i charakteryzacji przyrządów półprzewodnikowych Katedry Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza. Jestem odpowiedzialny za doskonalenie technik pomiarowych szumów, oprogramowanie procedur pomiarowych, utrzymanie systemów akwizycji danych i systemów kontrolno-pomiarowych. Jestem autorem oprogramowania tych systemów (LabVIEW) a także narzędzi do analizy zbieranych danych i pomocniczych aplikacji ułatwiających interpretację wyników (np. programów komputerowych do modelowania charakterystyk). Rozwijam inne techniki charakteryzacji przyrządów i materiałów półprzewodnikowych, w tym: pomiary I-V, pomiary impedancyjne oraz spektroskopię DLTS.
- Sporządziłem recenzje artykułów naukowych dla czasopism: IEEE Transactions on Electron Devices (6 recenzji), Advanced Optoelectronic Materials (2 recenzje), MDPI Applied Sciences, Optical and Quantum Electronics.
- Jestem członkiem kolegialnych organów uczelni: Rada Wydziału Elektrotechniki i Informatyki w kadencji 2024-2028.

### 6.2 Osiągnięcia dydaktyczne

W ramach działalności dydaktycznej prowadziłem zajęcia (wykłady, ćwiczenia lub laboratoria) dla studentów kierunków Elektronika i telekomunikacja, Elektrotechnika,

Informatyka, Automatyka i robotyka z następujących przedmiotów: Analogowe układy elektroniczne, Elektronika, Elektronika dla informatyków, Podstawy elektroniki, Elementy elektroniczne, Elementy i układy elektroniczne oraz Programowa obsługa aparatury elektronicznej. Dla tego ostatniego przedmiotu opracowałem od podstaw materiały dydaktyczne (wykłady, instrukcje) a także stanowiska laboratoryjne. Ponadto byłem opiekunem projektów inżynierskich, prac inżynierskich i magisterskich (łącznie ponad dwudziestokrotnie, w tym pięciokrotnie dla prac magisterskich). Jestem promotorem pomocniczym w dwóch trwających przewodach doktorskich - mgr. inż. M. Makowca i mgr. inż. P. Knutela.

### 6.3 Osiągnięcia popularyzatorskie

Rysunek z pracy “Investigation of trap levels in HgCdTe IR detectors through low frequency noise spectroscopy,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 035004, 2016 wybrano na okładkę numeru i zostałem zaproszony do napisania “Labtalka” – krótkiego popularyzatorskiego tekstu na temat badań w tej pracy, który ukazał się na stronie czasopisma.

## Literatura

- [1] Z. Bielecki, K. Achtenberg, M. Kopytko, J. Mikołajczyk, J. Wojtas, and A. Rogalski, “Review of photodetectors characterization methods,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 70, no. 2, pp. e140534-e140534, 04.03.2022, 2022.
- [2] Y. Liu, Y. Ma, X. Li, X. He, Y. Chen, S. Deng, X. Shao, B. Yang, Y. Gu, T. Li, and H. Gong, “Noise behaviors of SWIR In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP focal plane arrays as a function of lattice-mismatch degree,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 123, 2022.
- [3] W. Liang, Z. Liqi, X. Zhicheng, W. Fangfang, C. Jianxin, and C. Baile, “Investigation of low frequency noise-current correlation for the InAs/GaSb type-II superlattice long-wavelength infrared detector,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 5, 2022.
- [4] X. Han, H. Guo, L. Yang, L. Zhu, D. Yang, H. Xie, F. Wang, L. Chen, B. Chen, and L. He, “Dark current and noise analysis for Long-wavelength infrared HgCdTe avalanche photodiodes,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 123, 2022.
- [5] P. Guinedor, A. Brunner, L. Rubaldo, D. Bauza, G. Reibold, and D. Billon-Lanfrey, “Low-Frequency Noises and DLTS Studies in HgCdTe MWIR Photodiodes,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 48, no. 10, pp. 6113-6117, 2019.

- [6] W. Hassis, O. Gravrand, J. Rothman, and S. Benahmed, "Low-Frequency Noise Characteristics of HgCdTe Infrared Photodiodes Operating at High Temperatures," *Journal of Electronic Materials*, vol. 42, no. 11, pp. 3288-3296, 2013.
- [7] T. Tansel, K. Kutluer, Ö. Salihoglu, A. Aydinli, B. Aslan, B. Arikan, M. C. Kilinc, Y. Ergun, U. Serincan, and R. Turan, "Effect of the Passivation Layer on the Noise Characteristics of Mid-Wave-Infrared InAs/GaSb Superlattice Photodiodes," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 9, pp. 790-792, 2012.
- [8] R. J. Westerhout, C. A. Musca, J. Antoszewski, J. M. Dell, and L. Faraone, "Investigation of 1/f Noise Mechanisms in Midwave Infrared HgCdTe Gated Photodiodes," *Journal of Electronic Materials*, vol. 36, no. 8, pp. 884-889, 2007.
- [9] N. Mainzer, E. Lakin, and E. Zolotoyabko, "Point-defect influence on 1/f noise in HgCdTe photodiodes," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 4, pp. 763-765, 2002.
- [10] S. H. Bae, S. J. Lee, Y. H. Kim, H. C. Lee, and C. K. Kim, "Analysis of 1/f noise in LWIR HgCdTe photodiodes," *Journal of Electronic Materials*, vol. 29, no. 6, pp. 877-882, 2000.
- [11] G. M. Williams, R. E. De Wames, J. Bajaj, and E. R. Blazejewski, "Photo-induced excess low frequency noise in HgCdTe photodiodes," *Journal of Electronic Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 931-941, 1993.
- [12] W. A. Radford, and C. E. Jones, "1/f noise in ion-implanted and double-layer epitaxial HgCdTe photodiodes," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 3, no. 1, pp. 183-188, 1985.
- [13] S. P. Tobin, S. Iwasa, and T. J. Tredwell, "1/f Noise in (Hg, Cd)Te photodiodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 27, no. 1, pp. 43-48, 1980.
- [14] P. Martyniuk, A. Rogalski, and S. Krishna, "Interband Quantum Cascade Infrared Photodetectors: Current Status and Future Trends," *Physical Review Applied*, vol. 17, no. 2, pp. 027001, 02/11/, 2022.
- [15] D. O. Alshahrani, M. Kesaria, E. A. Anyebe, V. Srivastava, and D. L. Huffaker, "Emerging Type-II Superlattices of InAs/InAsSb and InAs/GaSb for Mid-Wavelength Infrared Photodetectors," *Advanced Photonics Research*, vol. 3, no. 2, Oct 22, 2021.
- [16] A. Rogalski, P. Martyniuk, and M. Kopytko, "InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect," *Applied Physics Reviews*, vol. 4, no. 3, pp. 031304, 2017.
- [17] M. A. Kinch, "The Future of Infrared; III-Vs or HgCdTe?," *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, no. 9, pp. 2969-2976, 2015.
- [18] R. Landauer, "The noise is the signal," *Nature*, vol. 392, no. 6677, pp. 658-659, 1998.
- [19] L. K. J. Vandamme, "Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 41, no. 11, pp. 2176-2187, 1994.

- [20] D. M. Fleetwood, "Origins of 1/f Noise in Electronic Materials and Devices: A Historical Perspective," *Noise in Nanoscale Semiconductor Devices*, T. Grasser, ed., pp. 1-31, Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [21] A. K. Raychaudhuri, "Measurement of 1/f noise and its application in materials science," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 6, no. 1, pp. 67-85, 2002.
- [22] Y. Kim, and H. Song, "Noise spectroscopy of molecular electronic junctions," *Applied Physics Reviews*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [23] Ł. Ciura, A. Kolek, J. Jureńczyk, K. Czuba, A. Jasik, I. Sankowska, and J. Kaniewski, "1/f Noise modeling of InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared detectors," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 1-11, 2017.
- [24] L. Ciura, A. Kolek, J. Jureńczyk, K. Czuba, A. Jasik, I. Sankowska, E. Papis-Polakowska, and J. Kaniewski, "Noise-Current Correlations in InAs/GaSb Type-II Superlattice Midwavelength Infrared Detectors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 12, pp. 4907-4912, 2016.
- [25] S. M. Johnson, D. R. Rhiger, J. P. Rosbeck, J. M. Peterson, S. M. Taylor, and M. E. Boyd, "Effect of dislocations on the electrical and optical properties of long-wavelength infrared HgCdTe photovoltaic detectors," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 10, no. 4, pp. 1499-1506, 1992.
- [26] A. P. Craig, M. D. Thompson, Z. B. Tian, S. Krishna, A. Krier, and A. R. J. Marshall, "InAsSb-based nBn photodetectors: lattice mismatched growth on GaAs and low-frequency noise performance," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 10, 2015.
- [27] E. A. Garduno, V. M. Cowan, G. D. Jenkins, C. P. Morath, and E. H. Steenbergen, "Comparison of Pre- and Post-Irradiation Low-Frequency Noise Spectra of Midwave Infrared nBn Detectors With Superlattice Absorbers," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 4, pp. 1042-1047, 2017.
- [28] L. Ciura, A. Kolek, A. Kęłowski, D. Stanaszek, A. Piotrowski, W. Gawron, and J. Piotrowski, "Investigation of trap levels in HgCdTe IR detectors through low frequency noise spectroscopy," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 035004, 2016.
- [29] L. Zhu, J. Huang, Z. Xie, Z. Deng, L. Chen, C. Lin, and B. Chen, "Low-Frequency Noise Spectroscopy Characterization of HgCdTe Infrared Detectors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 2, pp. 547-551, 2020.
- [30] M. E. Levinshtein, and S. L. Rumyantsev, "Noise spectroscopy of local levels in semiconductors," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 1183-1189, 1994.
- [31] X. Hao, Z. Deng, J. Huang, Y. Huang, H. Yang, Y. Teng, Y. Zhao, Q. Wu, X. Li, J. Liu, Y. Chen, H. Zhu, and B. Chen, "Demonstration of a dual-band InAs/GaSb type-II superlattice

- infrared detector based on a single heterojunction diode,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, pp. 1-1, 2019.
- [32] V. M. More, Y. Kim, J. Jeon, J. C. Shin, and S. J. Lee, “Dual-band unipolar barrier infrared photodetector based on InGaAsSb bulk and type-II InAs/GaSb superlattice absorbers,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 868, 2021.
- [33] D. Wu, A. Dehzangi, and M. Razeghi, “Demonstration of mid-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> superlattice grown by metal-organic chemical vapor deposition,” *Applied Physics Letters*, vol. 115, no. 6, 2019.
- [34] Y. Teng, X. Hao, H. Zhu, H. Zhu, J. Liu, Y. Huai, M. Li, M. Liu, W. Xing, B. Chen, Z. Deng, and Y. Huang, “Demonstration of MOCVD-Grown Long-Wavelength Infrared InAs/GaSb Superlattice Focal Plane Array,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 60689-60694, 2021.
- [35] E. Plis, B. Klein, S. Myers, N. Gautam, and S. Krishna, “(111) InAs/GaSb type-II strained layer superlattice material for high operating temperature detection,” *physica status solidi (c)*, vol. 10, no. 5, pp. 748-751, 2013.
- [36] A. Khoshakhlagh, S. Myers, K. HaSul, E. Plis, N. Gautam, L. Sang Jun, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, “Long-Wave InAs/GaSb Superlattice Detectors Based on nBn and Pin Designs,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 46, no. 6, pp. 959-964, 2010.
- [37] A. M. Hoang, G. Chen, A. Haddadi, and M. Razeghi, “Demonstration of high performance bias-selectable dual-band short-/mid-wavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 1, 2013.
- [38] P. Martyniuk, W. Gawron, D. Stepien, D. Benyahia, A. Kowalewski, K. Michalczewski, and A. Rogalski, “Demonstration of Mid-Wave Type-II Superlattice InAs/GaSb Single Pixel Barrier Detector With GaAs Immersion Lens,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 37, no. 1, pp. 64-66, 2016.
- [39] P. Martyniuk, J. Wróbel, E. Plis, P. Madejczyk, A. Kowalewski, W. Gawron, S. Krishna, and A. Rogalski, “Performance modeling of MWIR InAs/GaSb/B–Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Sb type-II superlattice nBn detector,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 5, 2012.
- [40] B. Chen, J. Yuan, and A. L. Holmes, “Dark current modeling of InP based SWIR and MWIR InGaAs/GaAsSb type-II MQW photodiodes,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 271-277, 2012.
- [41] T. Nguyen, C. A. Musca, J. M. Dell, J. Antoszewski, and L. Faraone, “Dark currents in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 33, no. 6, pp. 621-629, 2004.
- [42] V. Gopal, S. Gupta, R. K. Bhan, R. Pal, P. K. Chaudhary, and V. Kumar, “Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n<sup>+</sup>-p junctions,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 143-152, 2003.

- [43] J. Bajaj, "Noise (1/f) and dark currents in midwavelength infrared PACE-I HgCdTe photodiodes," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 10, no. 4, 1992.
- [44] J. Bajaj, G. M. Williams, N. H. Sheng, M. Hinrichs, D. T. Cheung, J. P. Rode, and W. E. Tennant, "Excess (1/f) noise in Hg<sub>0.7</sub>Cd<sub>0.3</sub>Te p-n junctions," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 3, no. 1, pp. 192-194, 1985.
- [45] Y. Nemirovsky, "Tunneling and 1/f noise currents in HgCdTe photodiodes," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 10, no. 4, 1992.
- [46] L. Ciura, A. Kolek, J. Wrobel, W. Gawron, and A. Rogalski, "1/f Noise in Mid-Wavelength Infrared Detectors With InAs/GaSb Superlattice Absorber," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, no. 6, pp. 2022-2026, 2015.
- [47] A. I. D'Souza, M. G. Stapelbroek, P. N. Dolan, P. S. Wijewarnasuriya, R. E. DeWames, D. S. Smith, and J. C. Ehlert, "1/f noise in large-area Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te photodiodes," *Journal of Electronic Materials*, vol. 32, no. 7, pp. 633-638, 2003.
- [48] M. Kopytko, and A. Rogalski, "Performance Evaluation of Type-II Superlattice Devices Relative to HgCdTe Photodiodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 69, no. 6, pp. 2992-3002, 2022.
- [49] A. Rogalski, P. Martyniuk, and M. Kopytko, "Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 68, 2019.
- [50] S. V. Melkonyan, V. M. Aroutiounian, F. V. Gasparyan, and H. V. Asriyan, "Phonon mechanism of mobility equilibrium fluctuation and properties of 1/f-noise," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 382, no. 1-2, pp. 65-70, 2006.
- [51] P. Christol, L. Konczewicz, Y. Cuminal, H. Aït-Kaci, J. B. Rodriguez, and A. Joullié, "Electrical properties of short period InAs/GaSb superlattice," *physica status solidi (c)*, vol. 4, no. 4, pp. 1494-1498, 2007.
- [52] D. Benyahia, L. Kubiszyn, K. Michalczewski, J. Boguski, A. Keblowski, P. Martyniuk, J. Piotrowski, and A. Rogalski, "Electrical Properties of Midwave and Longwave InAs/GaSb Superlattices Grown on GaAs Substrates by Molecular Beam Epitaxy," *Nanoscale Res Lett*, vol. 13, no. 1, pp. 196, Jul 5, 2018.
- [53] A. Khoshakhlagh, F. Jaeckel, C. Hains, J. B. Rodriguez, L. R. Dawson, K. Malloy, and S. Krishna, "Background carrier concentration in midwave and longwave InAs/GaSb type II superlattices on GaAs substrate," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 5, 2010.
- [54] P. Martyniuk, J. Antoszewski, M. Martyniuk, L. Faraone, and A. Rogalski, "New concepts in infrared photodetector designs," *Applied Physics Reviews*, vol. 1, no. 4, 2014.
- [55] J. Jiang, S. Tsao, T. O'Sullivan, M. Razeghi, and G. J. Brown, "Fabrication of indium bumps for hybrid infrared focal plane array applications," *Infrared Physics & Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 143-151, 2004.

- [56] P. V. Necliudov, S. L. Romyantsev, M. S. Shur, D. J. Gundlach, and T. N. Jackson, “1/f noise in pentacene organic thin film transistors,” *Journal of Applied Physics*, vol. 88, no. 9, pp. 5395-5399, 2000.
- [57] L. K. J. Vandamme, and W. M. G. van Bokhoven, “Conductance noise investigations with four arbitrarily shaped and placed electrodes,” *Applied Physics A*, vol. 14, no. 2, pp. 205-215, 1977.
- [58] E. A. Kadlec, B. V. Olson, M. D. Goldflam, J. K. Kim, J. F. Klem, S. D. Hawkins, W. T. Coon, M. A. Cavaliere, A. Tauke-Pedretti, T. R. Fortune, C. T. Harris, and E. A. Shaner, “Effects of electron doping level on minority carrier lifetimes in n-type mid-wave infrared InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sbx type-II superlattices,” *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 26, 2016.
- [59] B. C. Connelly, E. H. Steenbergen, H. E. Smith, S. Elhamri, W. C. Mitchel, S. Mou, G. D. Metcalfe, G. J. Brown, and M. Wraback, “Dependence of minority carrier lifetime of Be-doped InAs/InAsSb type-II infrared superlattices on temperature and doping density,” *physica status solidi (b)*, vol. 253, no. 4, pp. 630-634, 2016.
- [60] F. Callewaert, A. M. Hoang, and M. Razeghi, “Generation-recombination and trap-assisted tunneling in long wavelength infrared minority electron unipolar photodetectors based on InAs/GaSb superlattice,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 5, 2014.
- [61] D. V. Lang, “Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors,” *Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 7, pp. 3023-3032, 1974.
- [62] J. Wróbel, Ł. Ciura, M. Motyka, F. Szmulowicz, A. Kolek, A. Kowalewski, P. Moszczyński, M. Dyksik, P. Madejczyk, S. Krishna, and A. Rogalski, “Investigation of a near mid-gap trap energy level in mid-wavelength infrared InAs/GaSb type-II superlattices,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 11, pp. 115004, 2015.
- [63] A. P. Craig, V. Letka, M. Carmichael, T. Golding, and A. R. Marshall, “InAsSb-based detectors on GaSb for near-room-temperature operation in the mid-wave infrared,” *Applied Physics Letters*, vol. 118, no. 25, 2021.
- [64] W. Gawron, Ł. Kubiszyn, K. Michalczewski, J. Jureńczyk, J. Piotrowski, and P. Martyniuk, “Demonstration of T2SLs InAs/InAsSb Based Interband Cascade Detector Supported by Immersion Lens for LWIR,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 52, no. 11, pp. 7068-7073, 2023.
- [65] S. Krishnamurthy, and Z. G. Yu, “Theoretical study of native point defects in strained-layer superlattice systems,” *Journal of Applied Physics*, vol. 123, no. 16, pp. 161414, 2018.

.....  
(podpis wnioskodawcy)