
SPRAWOZDANIE

Imię	Jakub Pawłowski
Numer albumu	250193
Kierunek	Inżynieria Kwantowa
Rok/Semestr	Semestr letni 2020/2021
Materiał	AlGaAsSb
Data	22 marca 2021



Politechnika Wrocławska

Spis treści

1	Opis systemu materiałowego	1
1.1	Zastosowania materiałów binarnych	1
1.2	Zastosowania stopów trójskładnikowych	2
2	Opis modeli i metod	2
2.1	Schemat interpolacyjny	2
2.2	Parametry materiałów binarnych. Parametry nieliniowości.	3
2.3	Obliczone parametry stopów trójskładnikowych i stopu czteroskładnikowego.	4
2.3.1	Ustalony x , zmienny y	5
2.3.2	Ustalony y , zmienny x	9
3	Wyniki i dyskusja	13
	Dodatek: Wykresy parametrów materiałów trójskładnikowych	13
	Bibliografia	17

1. Opis systemu materiałowego

Badanym materiałem jest czteroskładnikowy stop AlGaAsSb. Znajduje on zastosowanie m.in. w budowie laserów na heterostrukturach [1], kaskadowych ogniw słonecznych [2] oraz w charakterze szerokopasmowego źródła światła wysokiej mocy, na zakresie spektralnym 2.2 μm do 2.5 μm , opartego na studni kwantowej [3].

Składa się on z 4 materiałów binarnych, związków III-V tj.:

- AlAs
- AlSb
- GaAs
- GaSb

Informacje o materiałach binarnych posłużą nam do wyznaczenia podstawowych parametrów materiałowych. Związki III-V w rozpatrywanym stopie czteroskładnikowym mieszają się, tworząc stopy trójskładnikowe. Są to:

- AlGaAs
- AlGaSb
- AlAsSb
- GaAsSb

1.1 Zastosowania materiałów binarnych

AlAs, GaAs, AlSb oraz GaSb tworzą kryształy o strukturze blendy cynkowej (stałe sieciowe odpowiednio 5.6611 Å, 5.6533 Å, 6.1355 Å oraz 6.0959 Å) i grupie przestrzennej $F\bar{4}3m$. Parametry materiałowe opisujące te związki można znaleźć w Adachi [4], Vurgaftman, Meyer, and Ram-Mohan [5], and Adachi [6, 7].

AlSb jest półprzewodnikiem grupy III-V o przerwie energetycznej 1.6 eV. Ze względu na możliwość hodowli dużych, pojedynczych kryształów o ruchliwości elektronów do 350 cm^2/Vs materiał ten jest wykorzystywany jako detektor fotonów [8].

GaAs jest półprzewodnikiem grupy III-V o przerwie energetycznej 1.441 eV. Jest to jeden z najbardziej popularnych półprzewodników. Stosowany zarówno w charakterze emitera promieniowania np. diody LED świecące w bliskiej podczerwieni [9] oraz absorbera, umożliwiając konstrukcję bardzo wydajnych ogniw słonecznych, zbliżających się do limitu Shockleya–Queissera [10].

GaSb jest półprzewodnikiem grupy III-V o wąskiej przerwie energetycznej 0.67 eV [11]. Materiał ten ma duży potencjał do zastosowań elektro-optycznych w zakresie bliskiej podczerwieni. Homozłącza oparte na GaSb są dobrym kandydatem na szybkie fotodiody lawinowe o niskim szumie [12]. Ze względu na stałą sieciową zgodną z różnymi trój- i czteroskładnikowymi stopami III-V, pokrywającymi szeroki zakres spektralny od 0.8 μm do 4.3 μm znajduje on zastosowanie jako substrat do tworzenia źródeł i detektorów [13]. Wykorzystywany jest również do budowy diód laserowych oraz fotodetektorów o wysokiej wydajności kwantowej [14, 15].

AlAs jest półprzewodnikiem grupy III-V o skośnej przerwie wzbronionej 2.16 eV [16]. Materiał ten znajduje zastosowanie jako emiter, np. do budowy stosowanych w spektroskopii kwantowych laserów kaskadowych operujących na zakresie spektralnym odpowiadającym częstotliwością 3.4 THz do 5 THz co odpowiada bliskiej podczerwieni [17].

1.2 Zastosowania stopów trójskładnikowych

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ jest materiałem półprzewodnikowym zbliżonym pod względem stałej sieciowej do GaAs, jednak o większej przerwie wzbronionej, która zmienia się między 1.42 eV a 2.16 eV. Dla $x < 0.4$ przerwa fundamentalna jest prosta. Znajduje on zastosowanie do budowy wydajnych fotodetektorów opartych na studiach kwantowych i pracujących w zakresie podczerwieni [18]. W tym materiale zaobserwowane zostały również nieliniowe efekty optyczne [19].

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ jest materiałem półprzewodnikowym grupy III-V. Przypomina on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tylko o niższej przerwie wzbronionej. Znajduje on zastosowanie do budowy fotodetektorów pracujących w podczerwieni [20], w tym do diod lawinowych [14, 15].

$\text{AlAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ jest materiałem półprzewodnikowym grupy III-V. Stosowany jest w charakterze zarówno detektora, do budowy nisko zaszumionych diód lawinowych [21] oraz emitera, w kwantowych laserach kaskadowych o długości fali ok. $\lambda = 3.7 \mu\text{m}$ w temperaturze pokojowej, a więc pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni [22].

$\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ jest materiałem półprzewodnikowym grupy III-V. Stosowany jest głównie jako fotodetektor pracujący w bliskiej podczerwieni [23, 24]. Innym interesującą aplikacją tego materiału jest zwiększenie długości fali emitowanej z kropki kwantowej InAs/GaAs, poprzez naniesienie jego cienkiej warstwy zmniejszającej naprężenia w kropce [25].

Parametry nieliniowości stopów trójskładnikowych mogą zostać znalezione w Vurgaftman, Meyer, and Ram-Mohan [5], Linnik and Christou [26], Adachi [6, 7], and Mozume et al. [27].

2. Opis modeli i metod

2.1 Schemat interpolacyjny

W celu znalezienia parametrów stopów trójskładnikowych znając parametry materiałów binarnych możemy posłużyć się dobrze znanym schematem interpolacyjnym [4]. W najprostszym, liniowym przybliżeniu parametr T materiału trójskładnikowego może zostać wy-

znaczonych przy pomocy parametrów binarnych korzystając ze wzoru:

$$T_{A_x B_{1-x} C}(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} \equiv a + bx \quad (2.1)$$

gdzie $a = B_{BC}$ oraz $b = B_{AC} - B_{BC}$. W praktyce, niektóre parametry materiałowe znacznie odbiegają od relacji (2.1) i wykazują w przybliżeniu kwadratową zależność od ułamka molowego x [7]:

$$T_{A_x B_{1-x} C}(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} - C_{A-B}x(1-x) \equiv a + bx + cx^2 \quad (2.2)$$

gdzie $a = B_{BC}$, $b = B_{AC} - B_{BC} + C_{A-B}$ oraz $c = C_{A-B}$. Parametr c to tzw. bowing parameter czyli parametr nieliniowości. Tym równaniem będziemy się posługiwać do wyznaczenia własności stopów trójskładnikowych, w przypadku liniowym podstawiając wartość 0 za parametr nieliniowości.

W przypadku, gdy interesują nas własności stopu czteroskładnikowego postaci $A_x B_{1-x} C_y D_{1-y}$, a znamy już własności stopów trójskładnikowych składających się na ten materiał możemy posłużyć się następującym związkiem [7]:

$$Q(x, y) = \frac{x(1-x)[yT_{ABC}(x) + (1-y)T_{ABD}(x)]}{x(1-x) + y(1-y)} \quad (2.3)$$

$$+ \frac{y(1-y)[xT_{ACD}(y) + (1-x)T_{BCD}(y)]}{x(1-x) + y(1-y)} \quad (2.4)$$

2.2 Parametry materiałów binarnych. Parametry nieliniowości.

Większość wykorzystanych parametrów materiałów binarnych oraz parametrów nieliniowości pochodzi z pracy przeglądowej “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys”, Vurgaftman, Meyer, and Ram-Mohan [5], za wyjątkiem mas efektywnych dziur lekkich, ciężkich oraz odpowiednich parametrów nieliniowości, które zostały zaczerpnięte z książki *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, Adachi [28]. Parametry materiałów binarnych zostały przedstawione w tabeli 2.1

Tabela 2.1: Parametry materiałów binarnych [5, 28]

Parametr	AlAs	AlSb	GaSb	GaAs
E_g^{Γ} (eV)	3.099	2.386	0.812	1.519
VBO (eV)	-1.33	-0.41	-0.03	-0.80
Δ_{SO} (eV)	0.28	0.676	0.76	0.341
a_{lc} (Å)	5.6611	6.1355	6.0959	5.65325
m_e^*	0.15	0.14	0.039	0.067
m_{hh}^{DOS}	0.81	0.9	0.37	0.55
m_{lh}^{DOS}	0.16	0.13	0.043	0.083

Parametry nieliniowości zostały przedstawione w tabeli 2.2. Masa efektywna elektronu w $GaAs_x Sb_{1-x}$ wyrażona jest wzorem [28]:

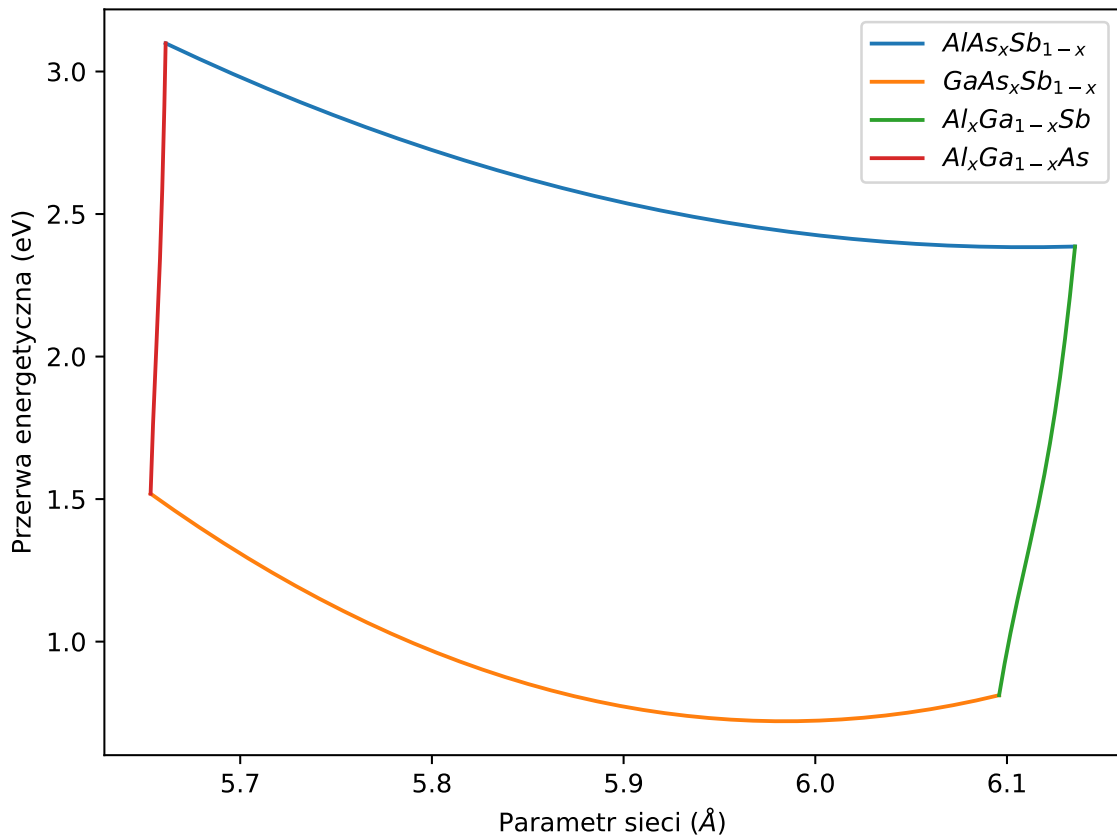
$$m_e^*(x) = 0.039 + 0.014x + 0.014x^2 \quad (2.5)$$

Tabela 2.2: Parametry nieliniowości stopów trójskładnikowych [5, 28]. Brak parametru nieliniowości oznaczony został “—”.

Parametr	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$	$\text{AlAs}_x\text{Sb}_{1-x}$	$\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$
E_g^Γ (eV)	$-0.127 + 1.310x$	$-0.044 + 1.22x$	0.8	1.43
VBO (eV)	—	—	-1.71	-1.06
Δ_{SO} (eV)	—	0.3	0.15	0.6
a_{lc} (Å)	—	—	—	—
m_e^*	—	—	—	(2.5)
m_{hh}^{DOS}	—	—	—	—
m_{lh}^{DOS}	—	—	—	—

2.3 Obliczone parametry stopów trójskładnikowych i stopu czteroskładnikowego.

Schematy interpolacyjne opisane w 2.1 zostały zaimplementowane w języku Python. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach.



Rysunek 2.1: Wykres przedstawiający szerokość przerwy wzbronionej w zależności od parametru sieci. Zamknięta krzywa stanowi ścieżkę łączącą różne materiały trójskładnikowe.

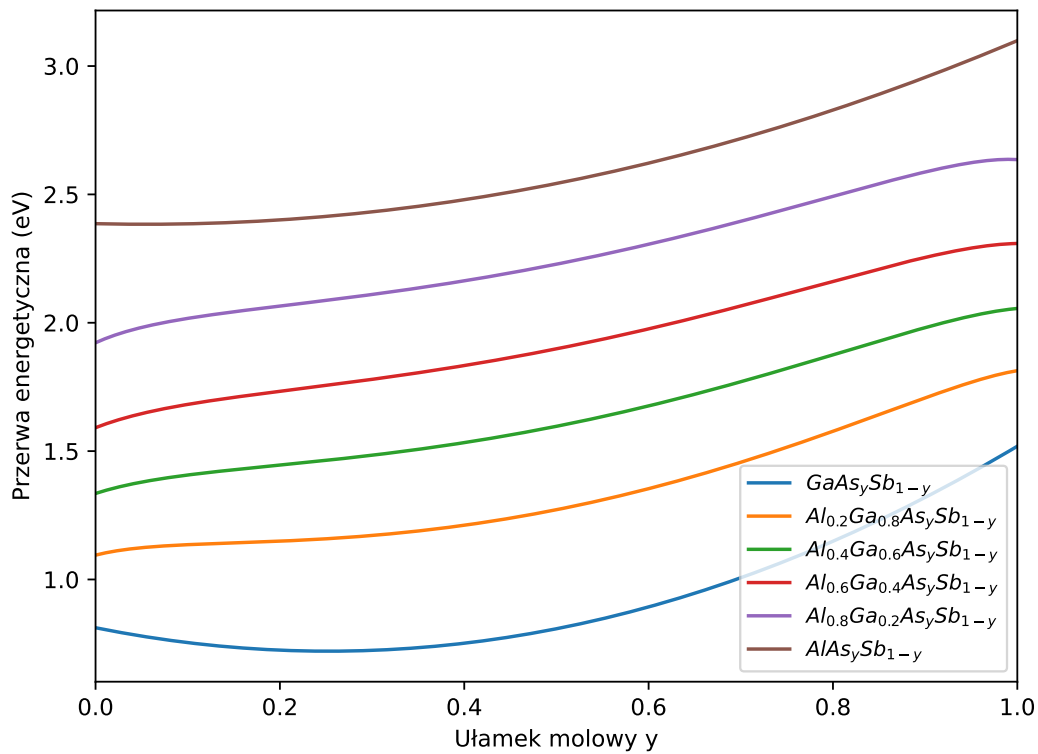
Pozostałe wykresy dotyczące parametrów materiałów trójskładnikowych zostały przedstawione w [Dodatku](#).

Przejdźmy teraz to przedstawienia wyników dla badanego materiału czteroskładnikowego tj. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$. Otrzymano dwie serie wykresów, najpierw dla ustalonego x w funkcji ułamka molowego y , a potem dla ustalonego y w funkcji x . Warto zwrócić uwagę na przypadki graniczne tj. $x = 0.0$, $x = 1.0$ lub $y = 0.0$, $y = 1.0$. Wówczas otrzymujemy krzywe zgodne z wynikami dla stopów trójskładnikowych, przedstawionymi w [Dodatku](#).

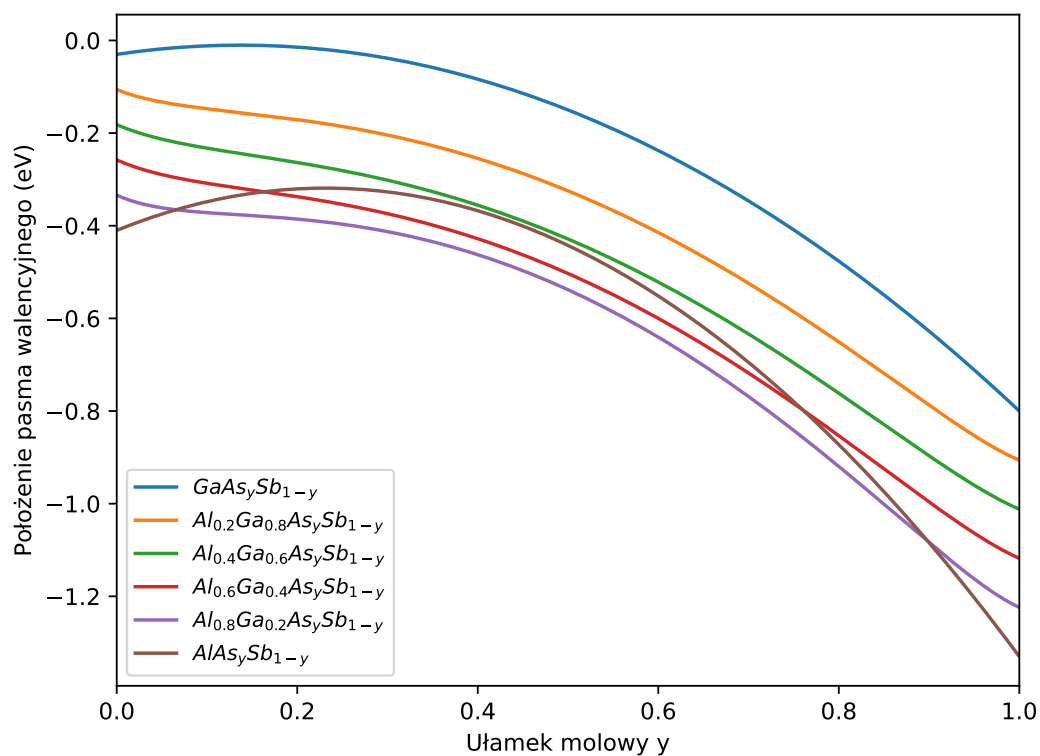
2.3.1 Ustalony x , zmienny y

W pierwszej serii wykresów ułamek molowy x przyjmuje ustalone wartości wynoszące $[0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$, a ułamek molowy y przyjmuje 1000 równoodległych wartości między 0.0 i 1.0.

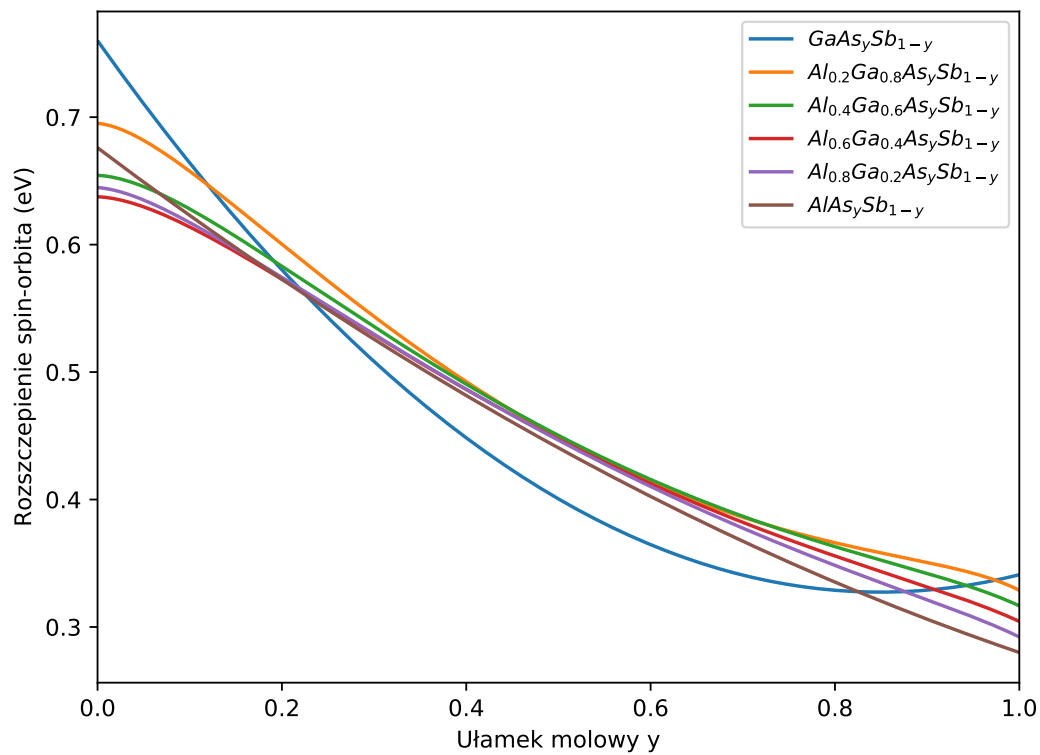
- E_g^{Γ} (eV) — rysunek 2.2
- VBO (eV) — rysunek 2.3
- Δ_{SO} — rysunek 2.4
- a_{lc} (Å) — rysunek 2.5
- m_e^* — rysunek 2.6
- m_{hh}^{DOS} — rysunek 2.7
- m_{lh}^{DOS} — rysunek 2.8



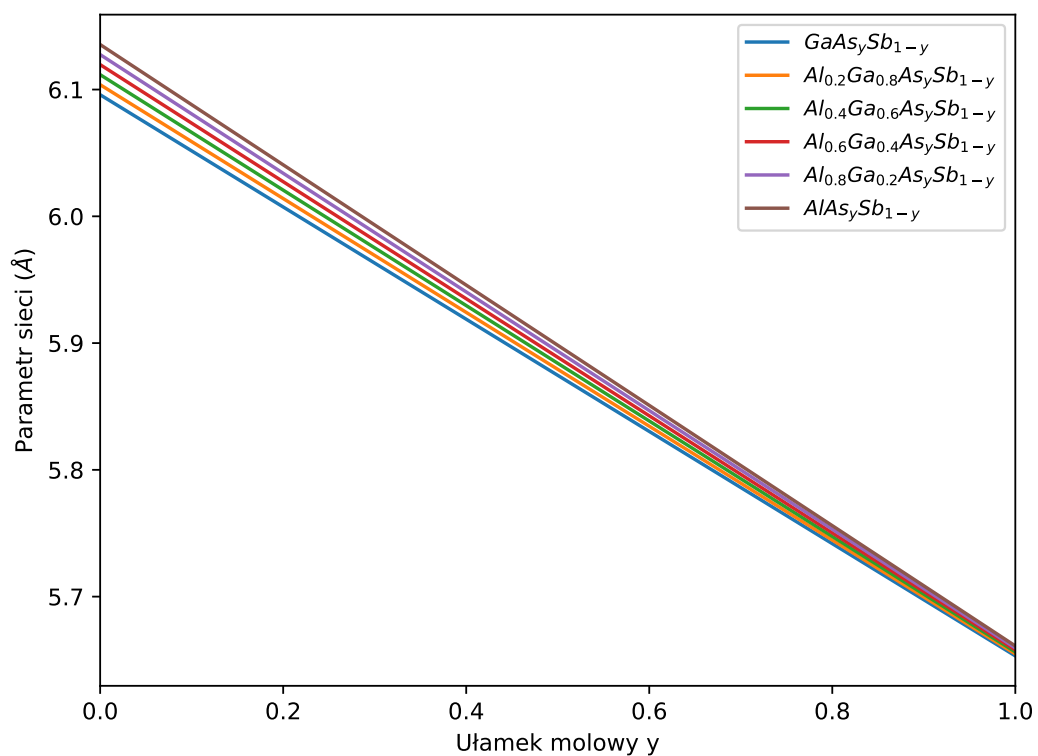
Rysunek 2.2: Wykres przedstawiający szerokość przerwy wzbronionej w funkcji ułamka molowego.



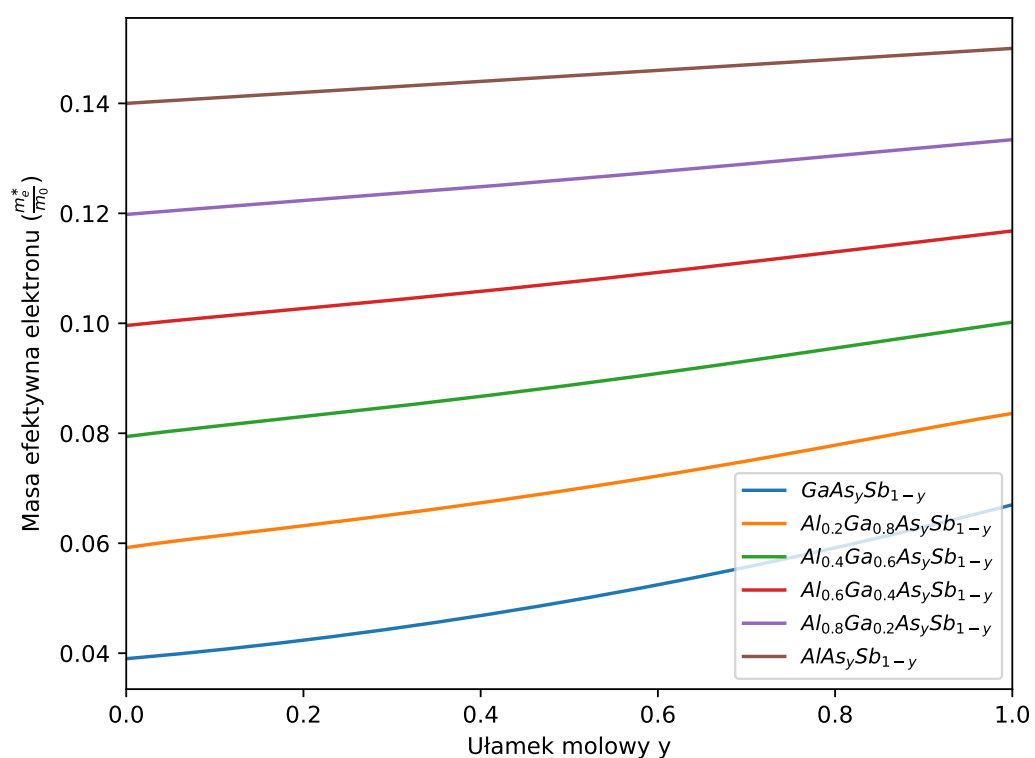
Rysunek 2.3: Wykres przedstawiający wierzchołek pasma walencyjnego w funkcji ułamka molowego.



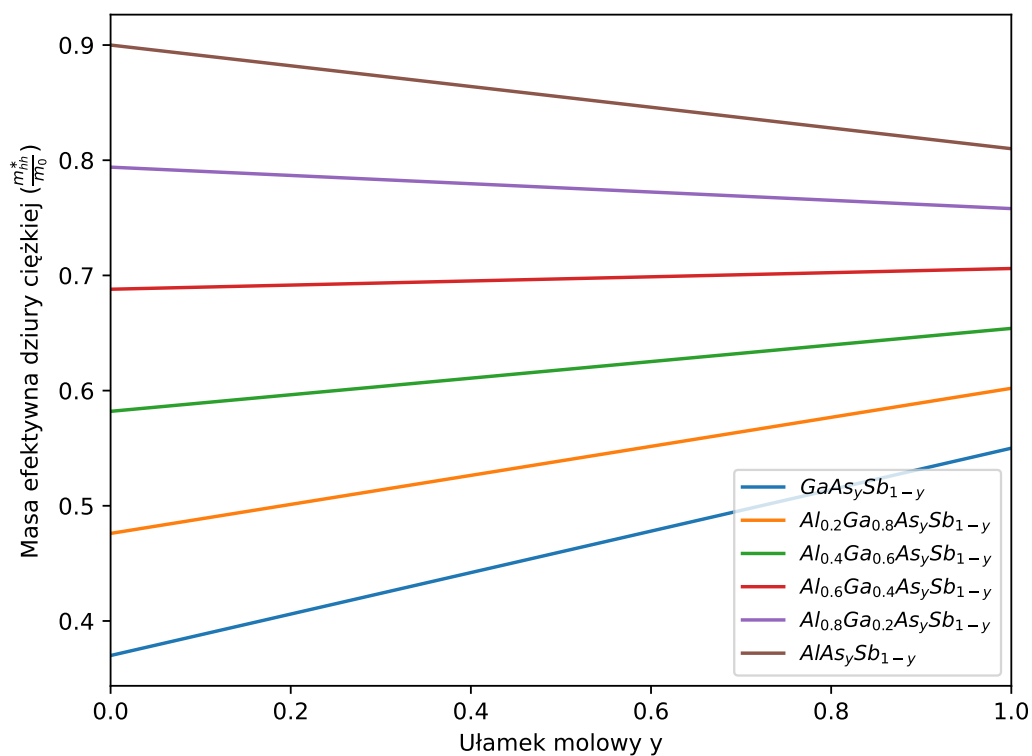
Rysunek 2.4: Wykres przedstawiający rozszczepienie spin-orbita w funkcji ułamka molowego.



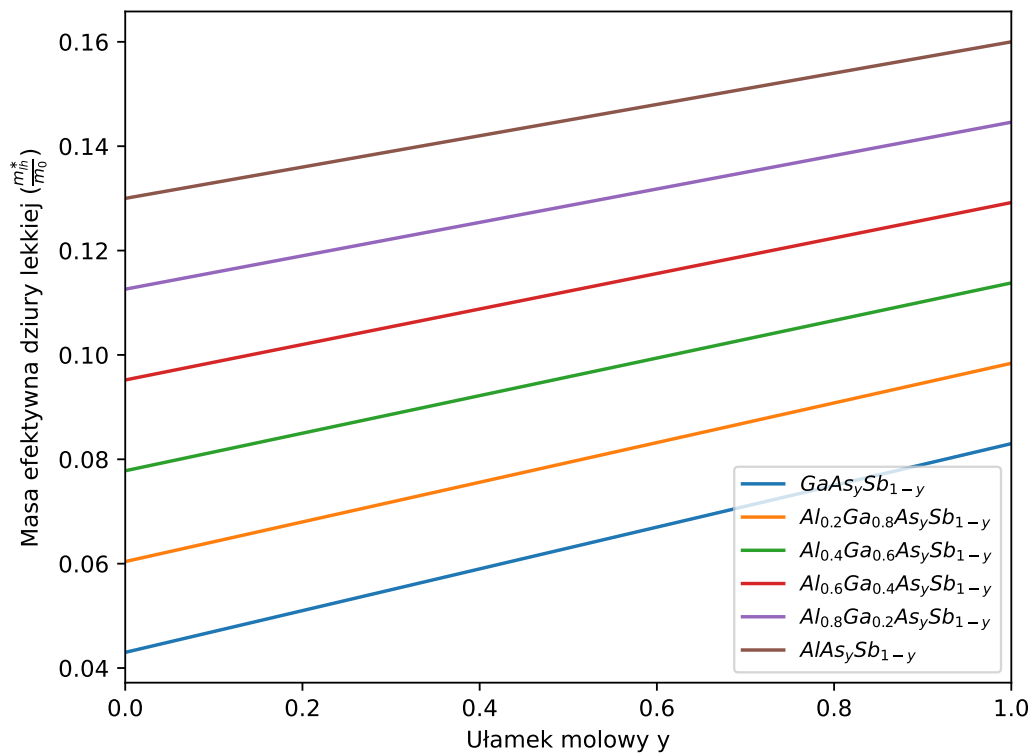
Rysunek 2.5: Wykres przedstawiający parametr sieciowy w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 2.6: Wykres przedstawiający masę efektywną elektronu w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 2.7: Wykres przedstawiający masę efektywną ciężkiej dziury w funkcji ułamka molowego.

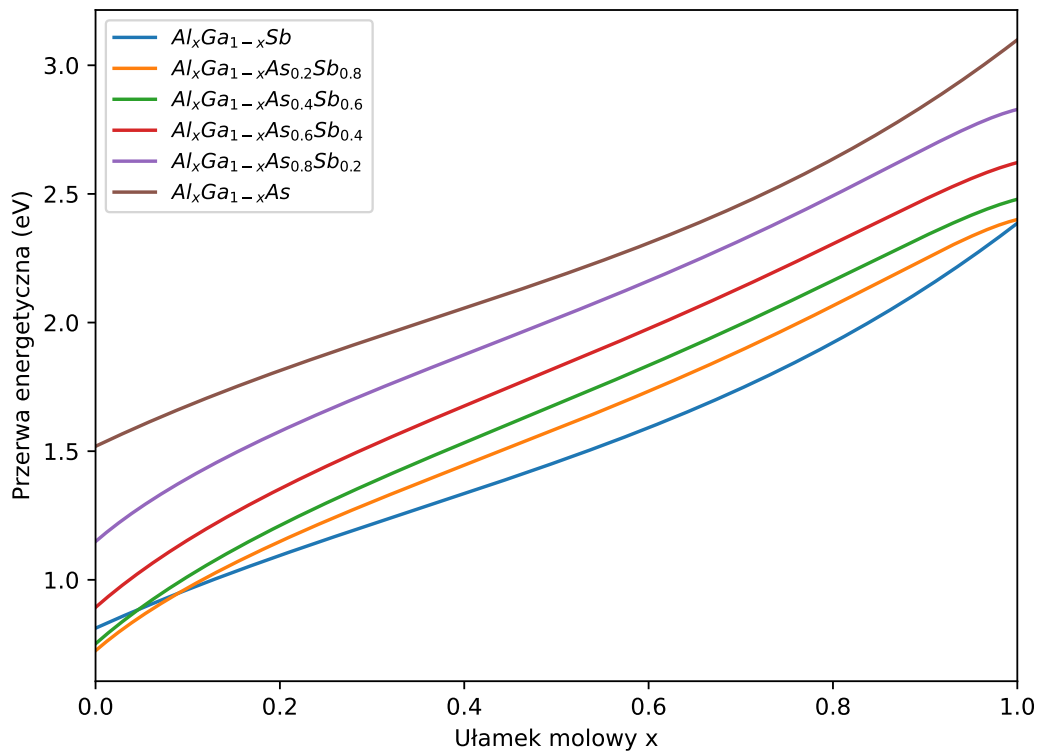


Rysunek 2.8: Wykres przedstawiający masę efektywną lekkiej dziury w funkcji ułamka molowego.

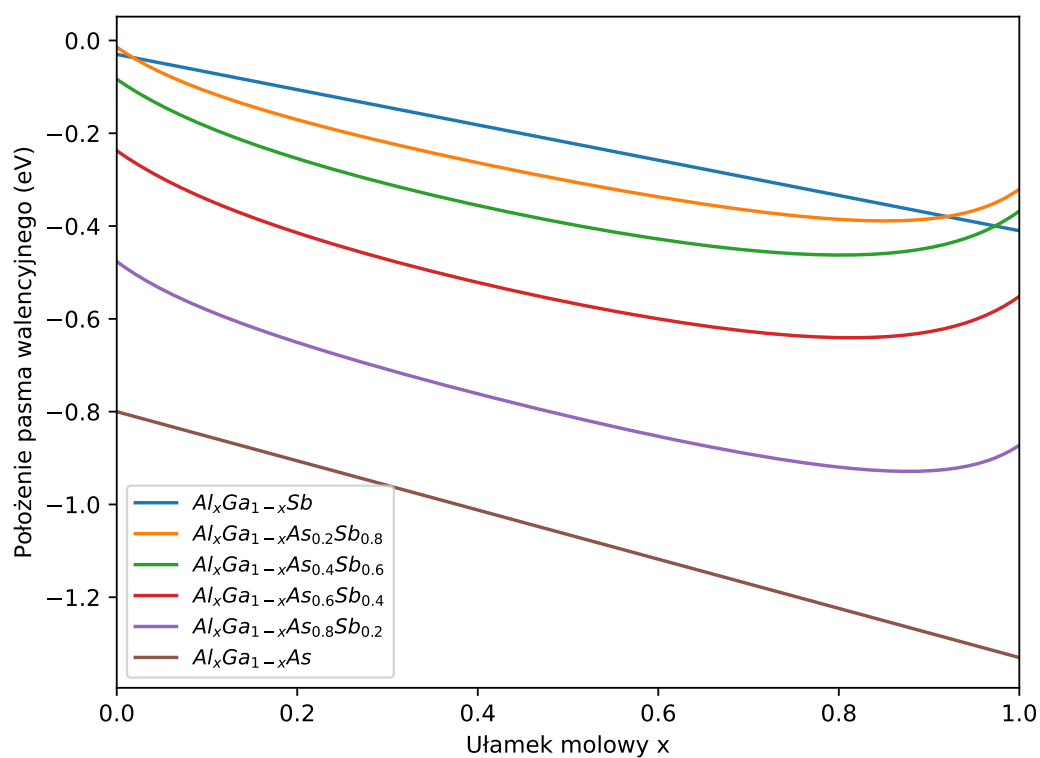
2.3.2 Ustalony y , zmienny x

W drugiej serii wykresów ułamek molowy y przyjmuje ustalone wartości wynoszące $[0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$, a ułamek molowy x przyjmuje 1000 równoodległych wartości między 0.0 i 1.0.

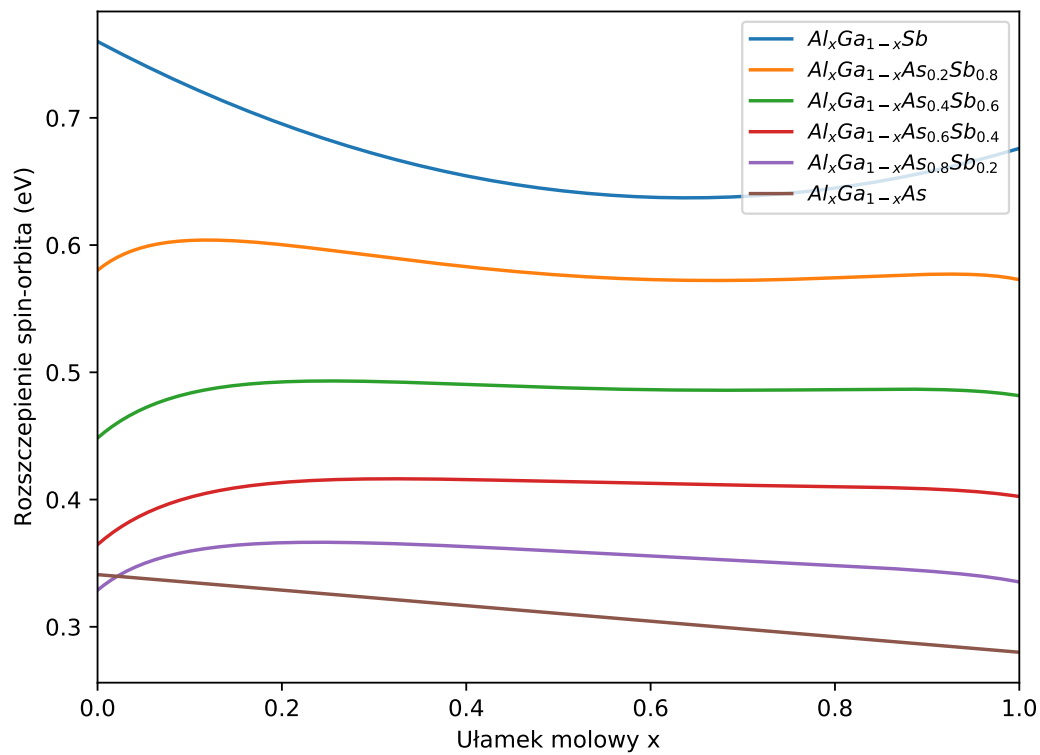
- E_g^{Γ} (eV) — rysunek 2.9
- VBO (eV) — rysunek 2.10
- Δ_{SO} — rysunek 2.11
- a_{lc} (Å) — rysunek 2.12
- m_e^* — rysunek 2.13
- m_{hh}^{DOS} — rysunek 2.14
- m_{lh}^{DOS} — rysunek 2.15



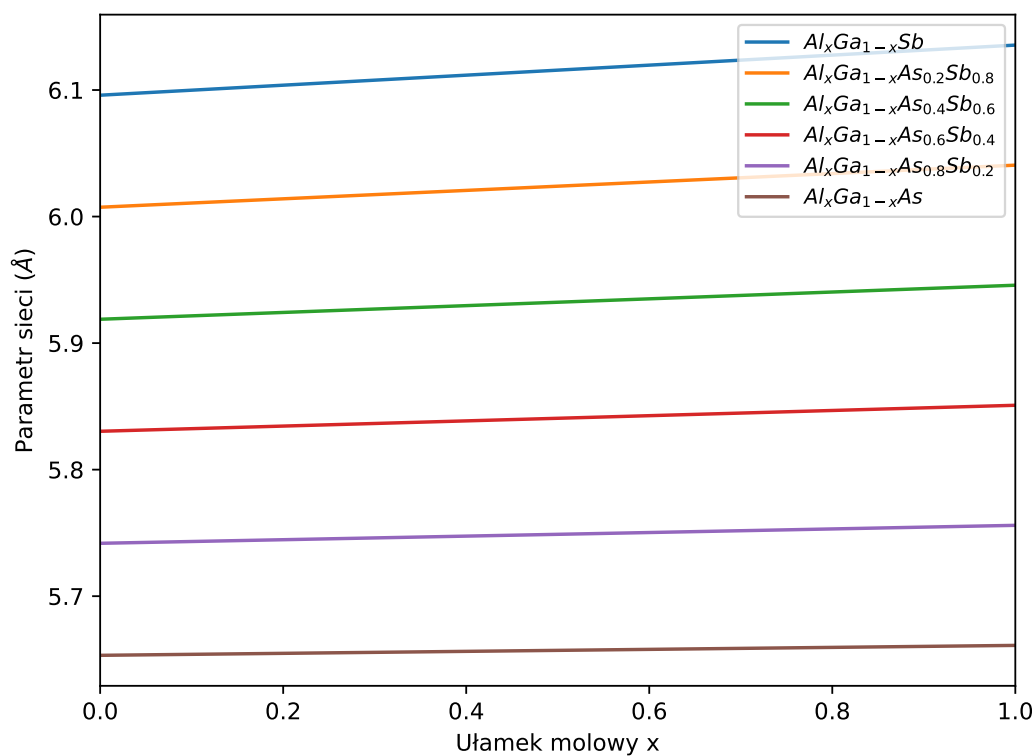
Rysunek 2.9: Wykres przedstawiający szerokość przerwy wzbronionej w funkcji ułamka molowego.



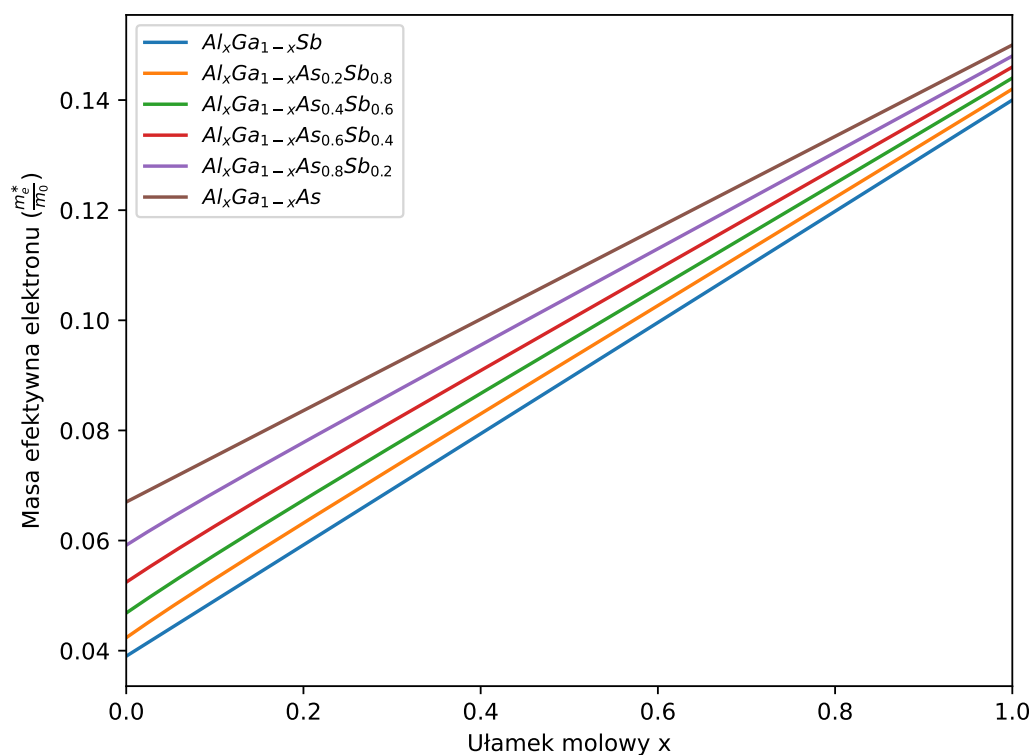
Rysunek 2.10: Wykres przedstawiający wierzchołek pasma walencyjnego w funkcji ułamka molowego.



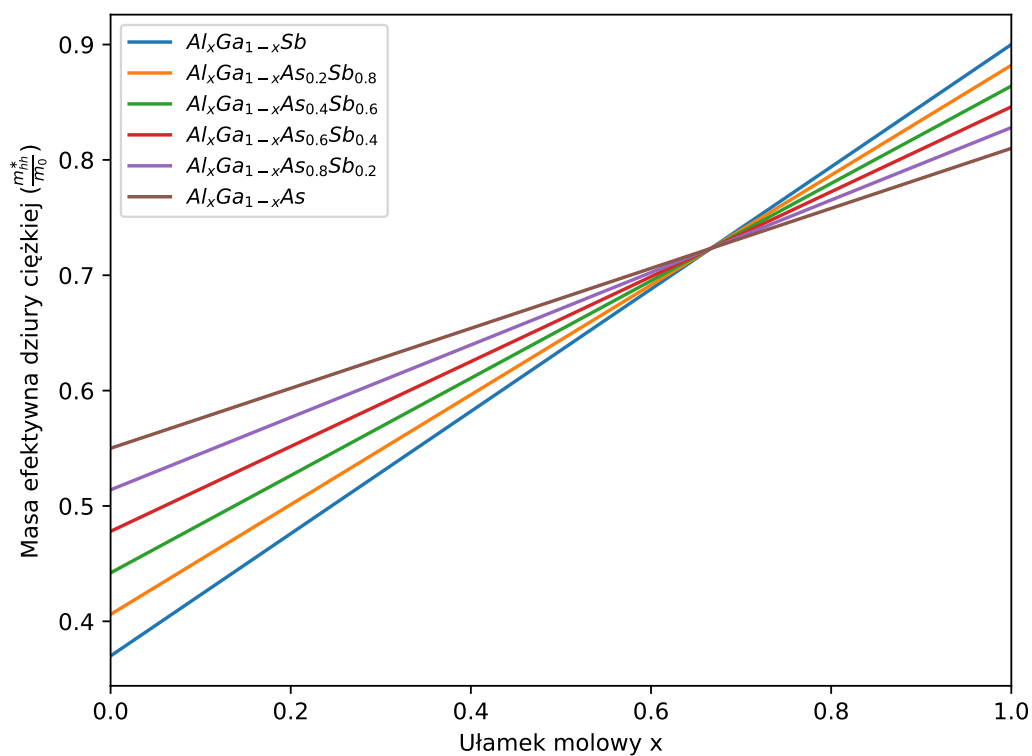
Rysunek 2.11: Wykres przedstawiający rozszczepienie spin-orbita w funkcji ułamka molowego.



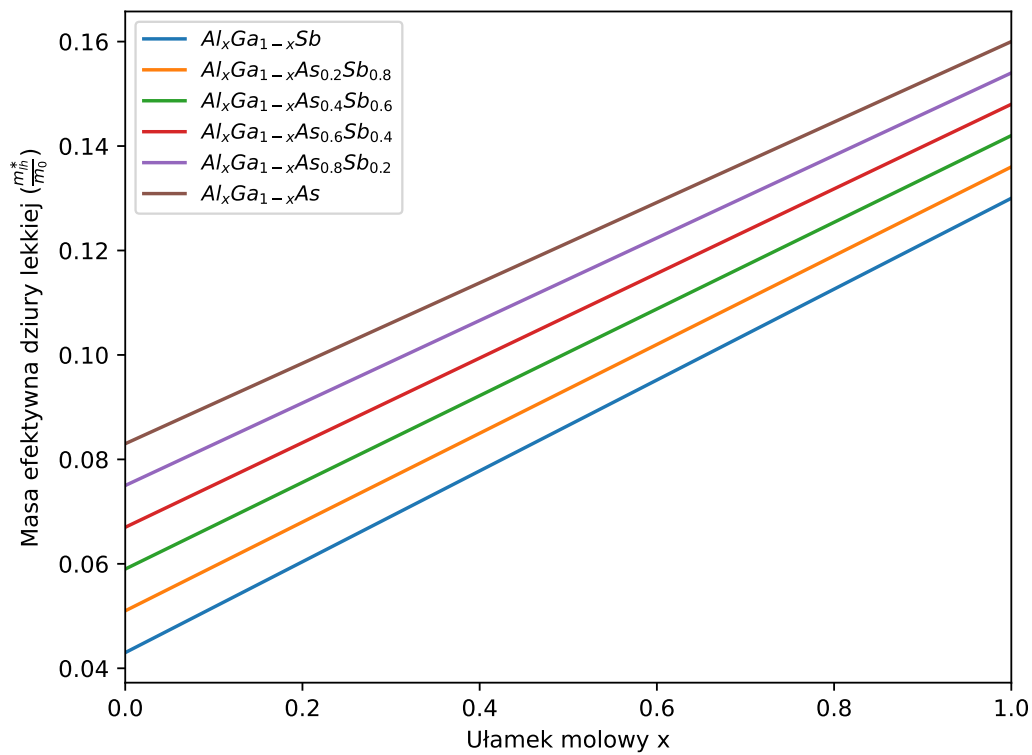
Rysunek 2.12: Wykres przedstawiający parametr sieciowy w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 2.13: Wykres przedstawiający masę efektywną elektronu w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 2.14: Wykres przedstawiający masę efektywną ciężkiej dziury w funkcji ułamka molowego.



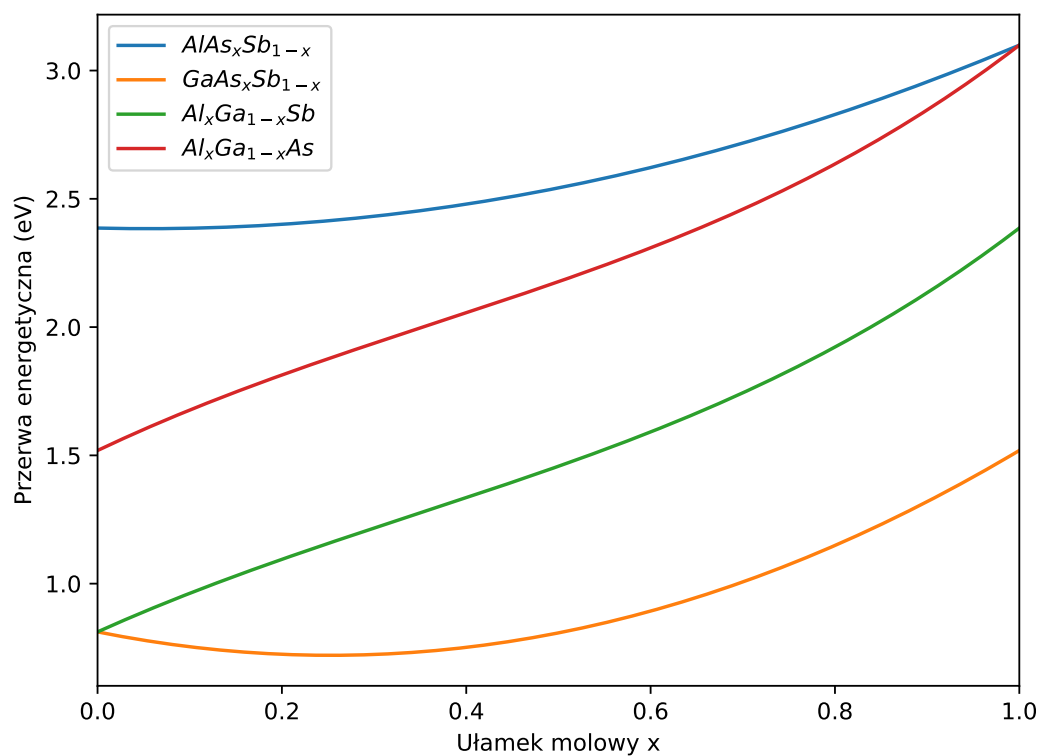
Rysunek 2.15: Wykres przedstawiający masę efektywną lekkiej dziury w funkcji ułamka molowego.

3. Wyniki i dyskusja

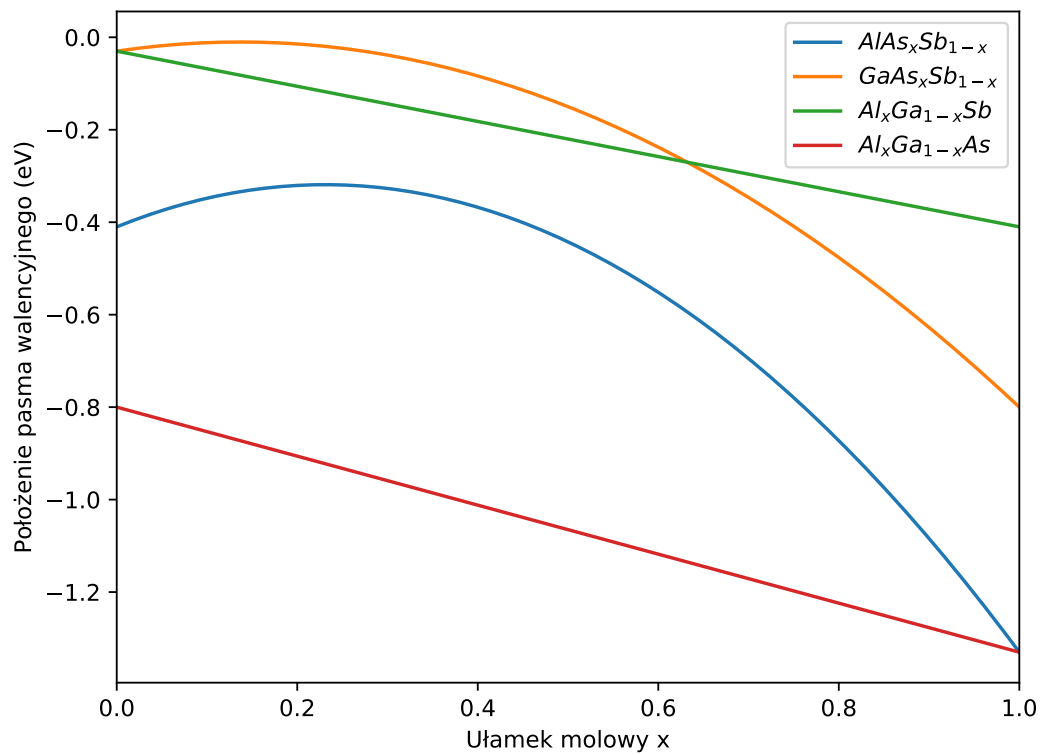
Dodatek: Wykresy parametrów materiałów trój-składnikowych

Poniżej zostały przedstawione wykresy interesujących nas parametrów:

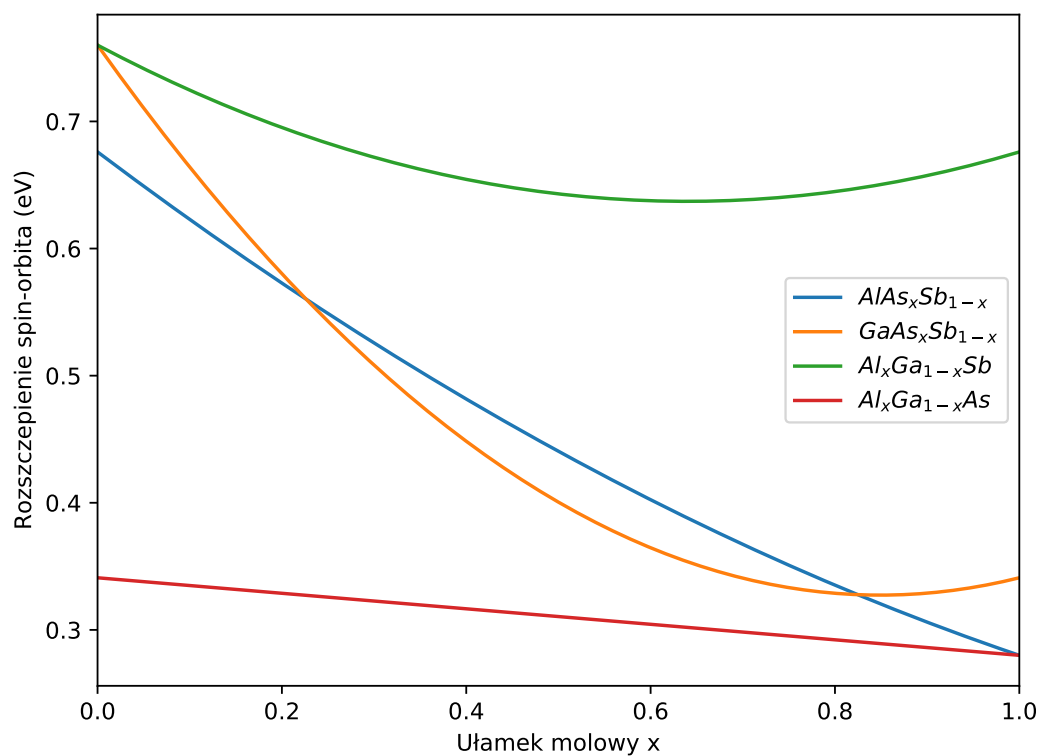
- $E_g^{\Gamma}(\text{eV})$ — rysunek 3.1
- VBO (eV) — rysunek 3.2
- Δ_{SO} — rysunek 3.3
- $a_{lc}(\text{\AA})$ — rysunek 3.4
- m_e^* — rysunek 3.5
- m_{hh}^{DOS} — rysunek 3.6
- m_{lh}^{DOS} — rysunek 3.7



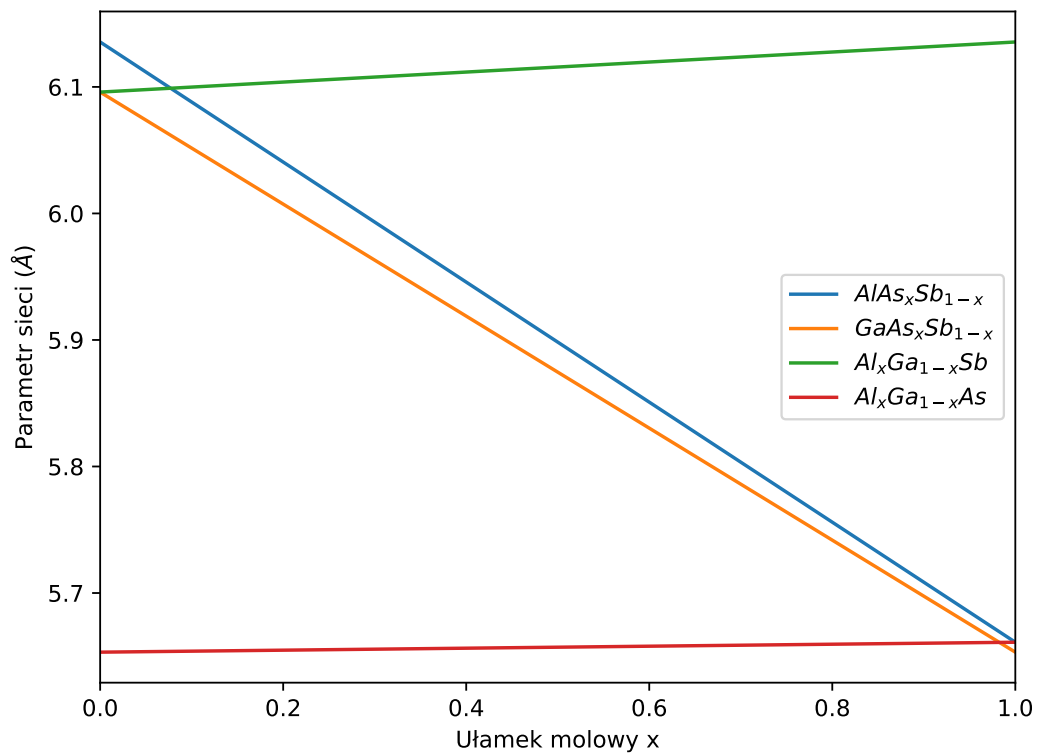
Rysunek 3.1: Wykres przedstawiający szerokość przerwy wzbronionej w funkcji ułamka molowego.



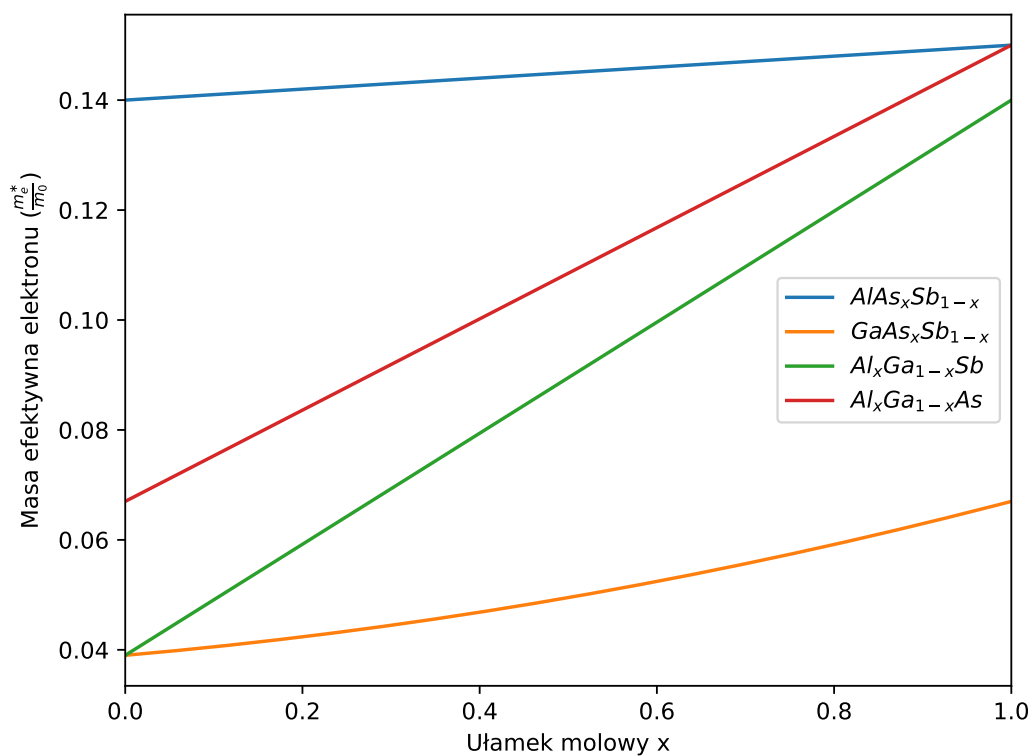
Rysunek 3.2: Wykres przedstawiający wierzchołek pasma walencyjnego w funkcji ułamka molowego.



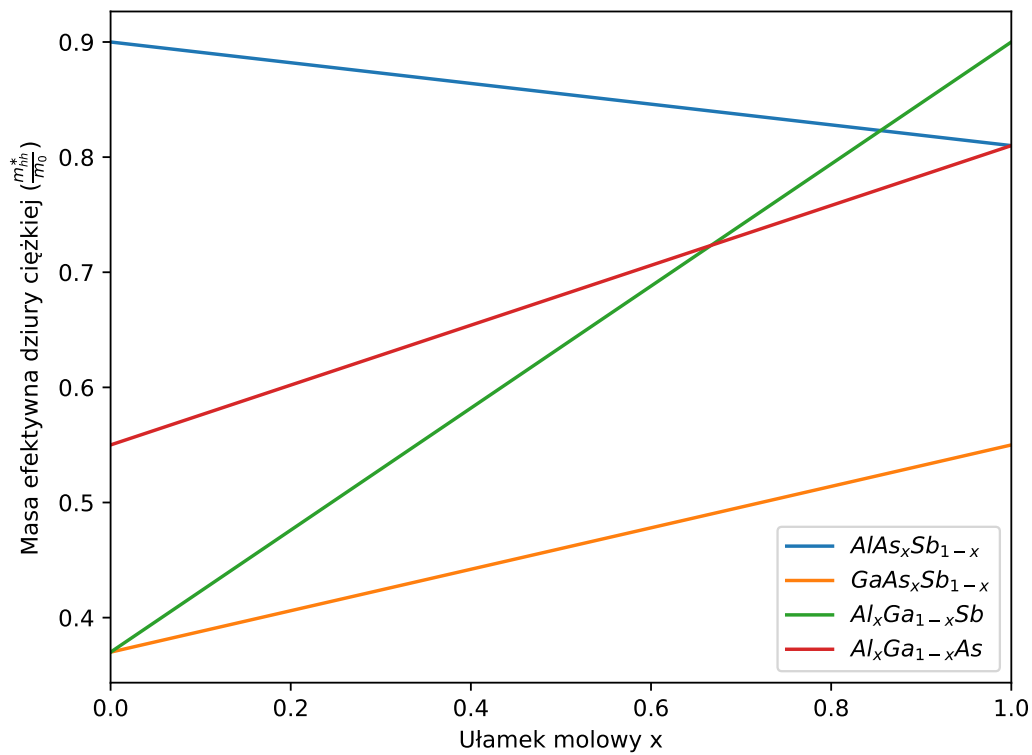
Rysunek 3.3: Wykres przedstawiający rozszczenie spin-orbita w funkcji ułamka molowego.



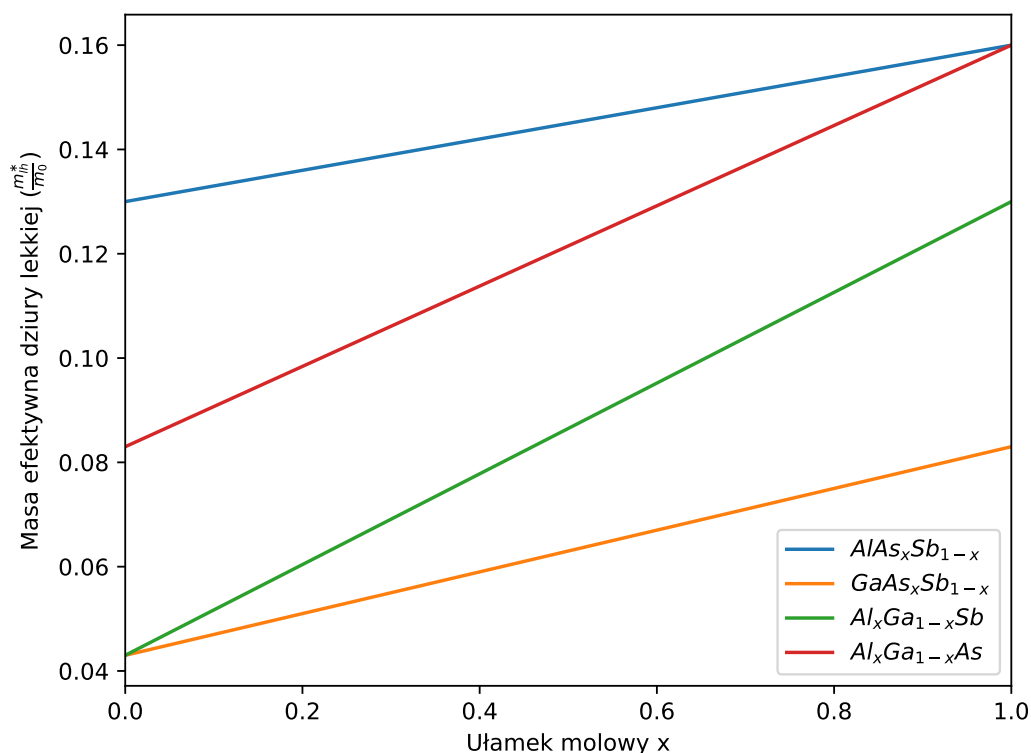
Rysunek 3.4: Wykres przedstawiający parametr sieciowy w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 3.5: Wykres przedstawiający masę efektywną elektronu w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 3.6: Wykres przedstawiający masę efektywną ciężkiej dziury w funkcji ułamka molowego.



Rysunek 3.7: Wykres przedstawiający masę efektywną lekkiej dziury w funkcji ułamka molowego.

Bibliografia

- [1] M. B.Z. Morosini et al. “Low-Threshold GaInAsSb/GaAlAsSb Double-Heterostructure Lasers Grown by LPE”. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 29.6 (1993), pp. 2103–2108. ISSN: 15581713. DOI: [10.1109/3.234475](https://doi.org/10.1109/3.234475).
- [2] Michael L. Timmons and S. M. Bedair. “AlGaAsSb/GaAsSb CASCADE SOLAR CELLS.” In: *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1981, pp. 1289–1293. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981pvsp.conf.1289T/abstract>.
- [3] M. B. Wootten et al. “Broadband 2.4 μ m superluminescent GaInAsSb/AlGaAsSb quantum well diodes for optical sensing of biomolecules”. In: *Semiconductor Science and Technology* 29.11 (Nov. 2014). ISSN: 13616641. DOI: [10.1088/0268-1242/29/11/115014](https://doi.org/10.1088/0268-1242/29/11/115014). URL: [/pmc/articles/PMC4283575/](https://pmc/articles/PMC4283575/)<https://pmc/articles/PMC4283575/?report=abstract%20https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4283575/>.
- [4] Sadao Adachi. “GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As”. In: *Journal of Applied Physics* 58.3 (Aug. 1985), R1–R29. ISSN: 00218979. DOI: [10.1063/1.336070](https://doi.org/10.1063/1.336070). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.336070>.

- [5] I Vurgaftman, J R Meyer, and L R Ram-Mohan. “Band parameters for III-V compounds and their alloys”. In: *Journal of Applied Physics* 89.11 I (2001), pp. 5815–5875. ISSN: 00218979. DOI: [10.1063/1.1368156](https://doi.org/10.1063/1.1368156). URL: <https://doi.org/10.1063/1.1368156>.
- [6] Sadao Adachi. “Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al_xGa_{1-x}As, and In_{1-x}Ga_xAs yP_{1-y}”. In: *Journal of Applied Physics* 66.12 (Dec. 1989), pp. 6030–6040. ISSN: 00218979. DOI: [10.1063/1.343580](http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.343580). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.343580>.
- [7] Sadao Adachi. “Iii-v ternary and quaternary compounds”. In: *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. 2017, pp. 725–741. DOI: [10.1007/978-3-319-48933-9_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9_30).
- [8] K. Seeger and E. Schonherr. “Microwave dielectric constant of aluminium antimonide”. In: *Semiconductor Science and Technology* 6.4 (Apr. 1991), pp. 301–302. ISSN: 02681242. DOI: [10.1088/0268-1242/6/4/013](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0268-1242/6/4/013). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0268-1242/6/4/013><https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0268-1242/6/4/013/meta>.
- [9] R. N. Hall et al. “Coherent light emission from GaAs junctions”. In: *Physical Review Letters* 9.9 (Nov. 1962), pp. 366–368. ISSN: 00319007. DOI: [10.1103/PhysRevLett.9.366](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.9.366). URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
- [10] Xufeng Wang et al. “Design of gaas solar cells operating close to the shockley-queisser limit”. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 3.2 (2013), pp. 737–744. ISSN: 21563381. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2013.2241594](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2241594).
- [11] S. K. Dubey et al. “Study of optical properties of swift heavy ion irradiated gallium antimonide”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Vol. 244. 1. North-Holland, Feb. 2006, pp. 141–144. DOI: [10.1016/j.nimb.2005.11.131](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.11.131).
- [12] A. G. Milnes and A. Y. Polyakov. *Gallium antimonide device related properties*. June 1993. DOI: [10.1016/0038-1101\(93\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0038-1101(93)90002-8).
- [13] P. S. Dutta, H. L. Bhat, and Vikram Kumar. “The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material”. In: *Journal of Applied Physics* 81.9 (May 1997), pp. 5821–5870. ISSN: 00218979. DOI: [10.1063/1.365356](http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.365356). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.365356>.
- [14] O. Hildebrand, W. Kuebart, and M. H. Pilkuhn. “Resonant enhancement of impact in Ga_{1-x}Al_xSb”. In: *Applied Physics Letters* 37.9 (Nov. 1980), pp. 801–803. ISSN: 00036951. DOI: [10.1063/1.92086](http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.92086). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.92086>.
- [15] O. Hildebrand et al. “Ga_{1-x}Al_xSb Avalanche Photodiodes: Resonant Impact Ionization with Very High Ratio of Ionization Coefficients”. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 17.2 (1981), pp. 284–288. ISSN: 15581713. DOI: [10.1109/JQE.1981.1071068](https://doi.org/10.1109/JQE.1981.1071068).
- [16] Nadir Bouarissa and Mustapha Boucenna. “Band parameters for AlAs, InAs and their ternary mixed crystals”. In: *Physica Scripta* 79.1 (Dec. 2009), p. 7. ISSN: 00318949. DOI: [10.1088/0031-8949/79/01/015701](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/79/01/015701). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/79/01/015701><https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/79/01/015701/meta>.

- [17] L. Schrottke et al. "Terahertz GaAs/AlAs quantum-cascade lasers". In: *Applied Physics Letters* 108.10 (Mar. 2016), p. 102102. ISSN: 00036951. DOI: [10.1063/1.4943657](https://doi.org/10.1063/1.4943657). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4943657>.
- [18] A. Köck et al. "Double wavelength selective GaAs/AlGaAs infrared detector device". In: *Applied Physics Letters* 60.16 (Apr. 1992), pp. 2011–2013. ISSN: 00036951. DOI: [10.1063/1.107127](https://doi.org/10.1063/1.107127). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.107127>.
- [19] J. S. Aitchison et al. "The nonlinear optical properties of AlGaAs at the half band gap". In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 33.3 (Mar. 1997), pp. 341–348. ISSN: 00189197. DOI: [10.1109/3.556002](https://doi.org/10.1109/3.556002).
- [20] H. David Law et al. "The GaAlAsSb Quaternary and GaAlSb Ternary Alloys and Their Application to Infrared Detectors". In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 17.2 (1981), pp. 275–283. ISSN: 15581713. DOI: [10.1109/JQE.1981.1071074](https://doi.org/10.1109/JQE.1981.1071074).
- [21] Chee Hing Tan, Shiyu Xie, and Jingjing Xie. "Low noise avalanche photodiodes incorporating a 40 nm ALASSB avalanche region". In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 48.1 (2012), pp. 36–41. ISSN: 00189197. DOI: [10.1109/JQE.2011.2176105](https://doi.org/10.1109/JQE.2011.2176105).
- [22] Quankui Yang et al. "Room-temperature short-wavelength GaInAsAlAsSb quantum-cascade lasers". In: *Applied Physics Letters* 88.12 (Mar. 2006), p. 121127. ISSN: 00036951. DOI: [10.1063/1.2190455](https://doi.org/10.1063/1.2190455). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2190455>.
- [23] Xiaoguang Sun et al. "GaAsSb A novel material for near infrared photodetectors on GaAs substrates". In: *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 8.4 (July 2002), pp. 817–822. ISSN: 1077260X. DOI: [10.1109/JSTQE.2002.800848](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2002.800848).
- [24] Ziyuan Li et al. "Room temperature GaAsSb single nanowire infrared photodetectors". In: *Nanotechnology* 26.44 (Oct. 2015), p. 445202. ISSN: 13616528. DOI: [10.1088/0957-4484/26/44/445202](https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/44/445202). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/26/44/445202>
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/26/44/445202/meta>.
- [25] H. Y. Liu et al. "Long-wavelength light emission and lasing from InAsGaAs quantum dots covered by a GaAsSb strain-reducing layer". In: *Applied Physics Letters* 86.14 (Apr. 2005), pp. 1–3. ISSN: 00036951. DOI: [10.1063/1.1897850](https://doi.org/10.1063/1.1897850). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1897850>.
- [26] M. Linnik and A. Christou. "Optical properties of AlGaAsSb, AlGaInP, AlGaInAs, and GaInAsP for optoelectronic applications". In: *Materials Research Society Symposium - Proceedings*. Vol. 579. Cambridge University Press, 2000, pp. 201–206. DOI: [10.1557/proc-579-201](https://doi.org/10.1557/proc-579-201). URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/optical-properties-of-algaassb-algalnp-algainas-and-gainasp-for-optoelectronic-applications/09557DFA2729E248A295F674B76190AE>.
- [27] T. Mozume et al. "Optical functions of AlAsSb characterized by spectroscopic ellipsometry". In: *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* 205.4 (Apr. 2008), pp. 872–875. ISSN: 18626300. DOI: [10.1002/pssa.200777811](https://doi.org/10.1002/pssa.200777811). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/pssa.200777811>.
- [28] Sadao Adachi. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, Mar. 2009, pp. 1–400. ISBN: 9780470744383. DOI: [10.1002/9780470744383](https://doi.org/10.1002/9780470744383). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470744383>.