

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie technologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D /3D

# Perowskitowe ogniska słoneczne - na jakim etapie technologicznym jesteśmy?

Rafał Staroszczyk

Perowskitowe ogniw  
słoneczne – na jakim etapie technologicznym jesteśmy?

Rafał Staroszczyk

Struktura perowskitu

Zastosowanie perowskitów

Perowskity halogenkowe

Stabilność strukturalna perowskitów 3D

Perowskit quasi-2D

Ruddlesden-Popper (R-P)

Dion-Jacobson (D-J)

Alternating Cation in Interlayer space (ACI)

Ognivo quasi-2D  
Ognivo hybrydowe  
2D /3D

Perowskity halogenkowe

- 1 Struktura perowskitu
- 2 Zastosowanie perowskitów
- 3 Perowskity halogenkowe  
    Stabilność strukturalna perowskitów 3D
- 4 Perowskit quasi-2D  
    Ruddlesden-Popper (R-P)  
    Dion-Jacobson (D-J)  
    Alternating Cation in Interlayer space (ACI)  
    Ognivo quasi-2D  
    Ognivo hybrydowe 2D/3D
- 5 Perowskity halogenkowe nieorganiczne  
    Podmiana X  
    Podmiana B  
    Podmiana A

# Struktura perowskitu

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie techn-  
ologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

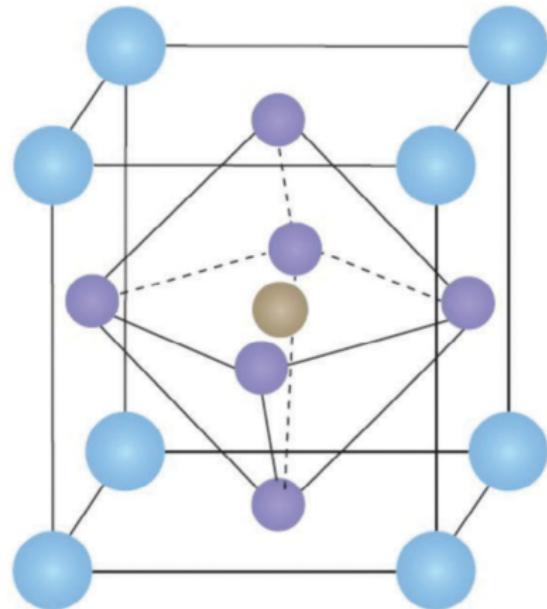
Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe

2D /3D

Perowskity  
halogenkowe



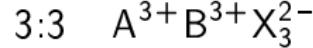
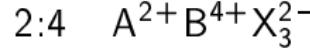
Rysunek: Ogólna struktura  
perowskitu:  $ABX_3$ , [1]

Pierwiastek A umieszczony jest  
w wierzchołkach

Pierwiastek X umieszczony jest  
w środkach ścian

Pierwiastek B umieszczony jest  
w środku sześcianu

## Różne jony



Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne –  
na jakim  
etapie tech-  
nologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

Perowskity  
halogenkowe

## Zastosowania [1]

- ① Fotodioda
- ② Dioda elektroluminescencyjna
- ③ Laser
- ④ Ognisko fotowoltaiczne
- ⑤ Memristor
- ⑥ Pressure-induced emission devices

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie techn-  
ologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

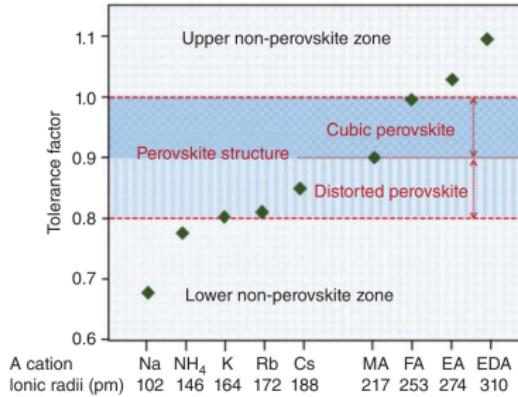
Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

## Goldschmidt tolerance factor

$$\tau = \frac{r_A + r_X}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \quad (1)$$

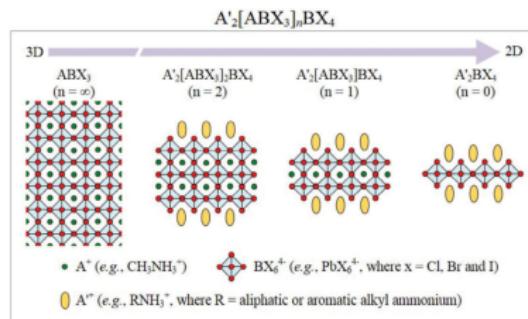


Rysunek: Tolerance factor dla wybranych jonów A w  $\text{APbI}_3$  [2]

## Struktury

Może występować w kilku strukturach:

- ① Ruddlesden-Popper (R-P)
- ② Dion-Jacobson (D-J)
- ③ Alternating Cation in Interlayer space (ACI)
- ④ Aurivillius (AV)



Rysunek: Perowskity 3D oraz 2D [1]

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie tech-  
nologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

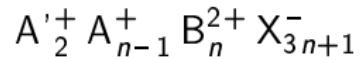
Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

## Wzór



## Przykładowe kationy

- ① Butyloamina (BA;  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3^+$ )
- ② Fenyloetyloamina (PEA;  $\text{Ph}(\text{CH}_2)_2\text{NH}_3^+$ )

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie techn-  
ologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

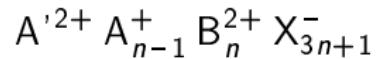
Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

Perowskity  
halogenkowe

## Wzór



## Przykładowe kationy

- ① Propylodiamina (PDA;  $\text{NH}_3^+ (\text{CH}_2)_3 \text{NH}_3^+$ )
- ② 3-(aminomethyl)pyridine (3AMP)

# Alternating Cation in Interlayer space (ACI)

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne -  
na jakim  
etapie techn-  
ologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

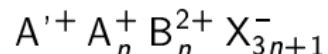
Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

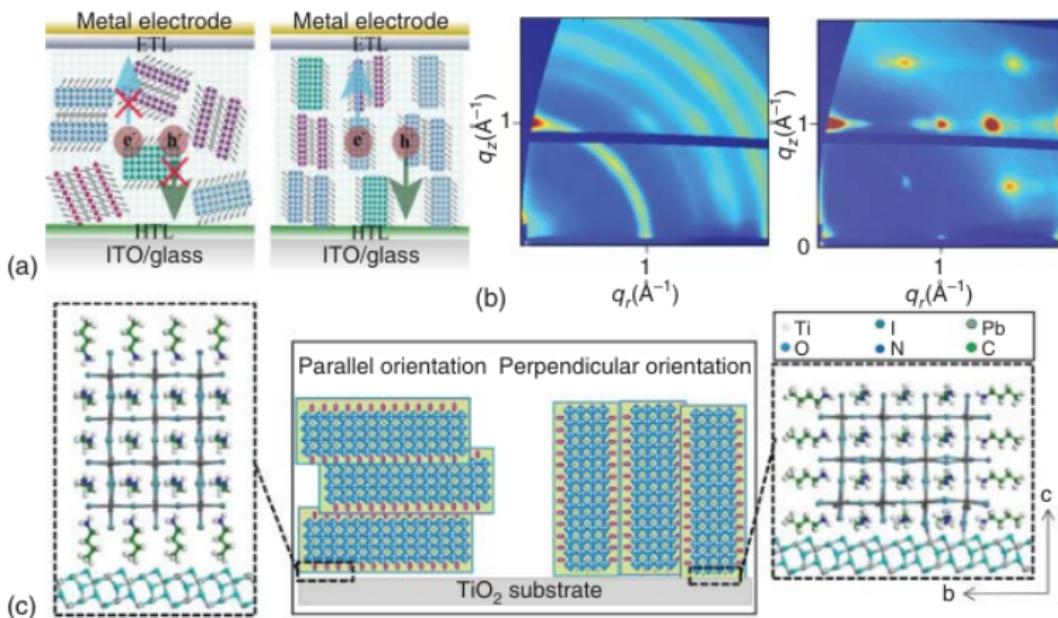
Perowskity  
halogenkowe

## Wzór



## Kationy

- ① Guanidinium ( $GA$ ;  $C(NH_2)_3^+$ )



Rysunek: Ogniwo na bazie perowskitu quasi-2D [3]

Perowskitowe ogniwka słoneczne - na jakim etapie technologicznym jesteśmy?

Rafał Staroszczyk

Struktura perowskitu

Zastosowanie perowskitów

Perowskity halogenkowe

Stabilność strukturalna perowskitów 3D

Perowskit quasi-2D

Ruddlesden-Popper (R-P)

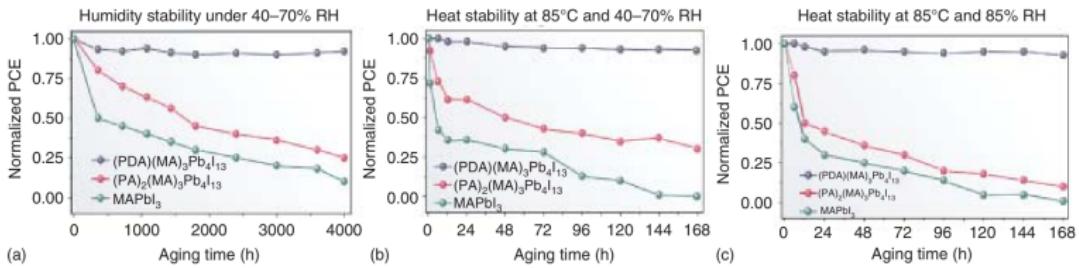
Dion-Jacobson (D-J)

Alternating Cation in Interlayer space (ACI)

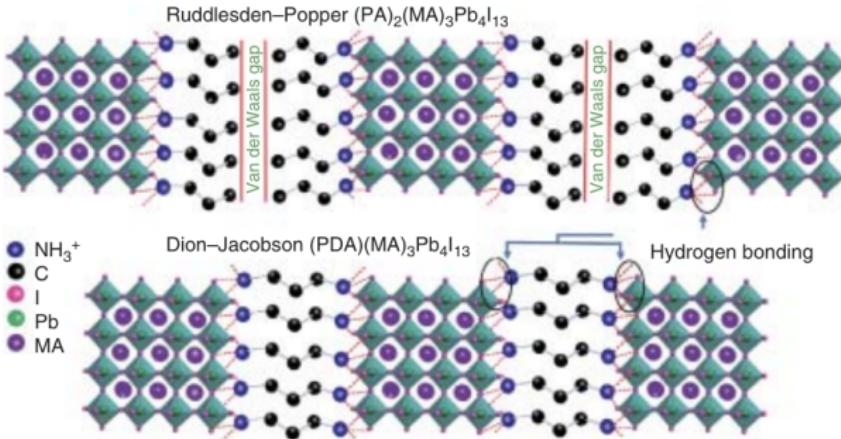
Ognivo quasi-2D

Ognivo hybrydowe 2D/3D

Perowskity halogenkowe



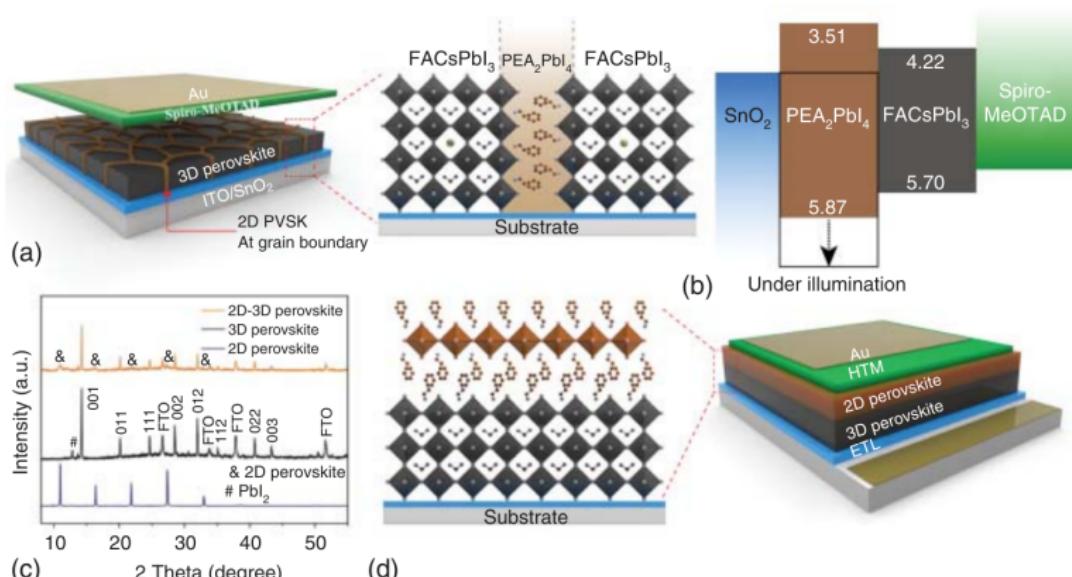
Rysunek: Stabilność różnych konfiguracji [3]



Rysunek: Badane struktury R-P oraz D-J [3]

# Ogniwo hybrydowe 2D/3D

Poprzez zmieszanie roztworu perowskitów 2D i 3D można otrzymać strukturę hybrydową. Stabilizuje to perowskity FA.



Rysunek: Ogniwo hybrydowe 2D/3D [3]

# Perowskity halogenkowe nieorganiczne

Perowskitowe ogniw  
słoneczne –  
na jakim etapie technologicznym jesteśmy?

Rafał Staroszczyk

Struktura perowskitu

Zastosowanie perowskitów

Perowskity halogenkowe

Stabilność strukturalna perowskitów 3D

Perowskit quasi-2D

Ruddlesden-Popper (R-P)

Dion-Jacobson (D-J)

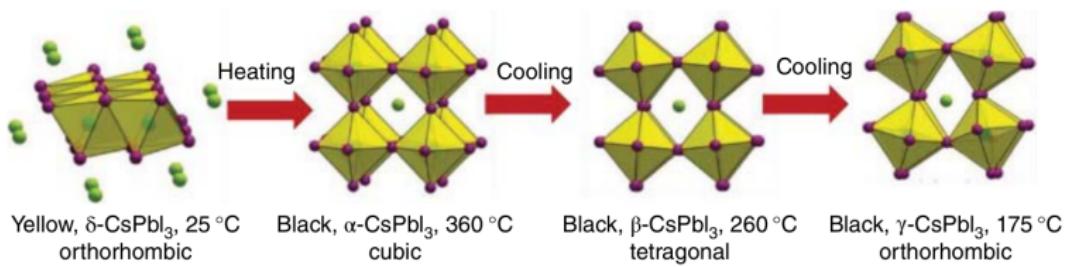
Alternating Cation in Interlayer space (ACI)

Ognivo quasi-2D

Ognivo hybrydowe  
2D / 3D

Perowskity halogenkowe

Najważniejszym perowskitem w tej grupie jest  $\text{CsPbI}_3$ , lecz jest on niestabilny. Można to poprawić na kilka sposobów.



Rysunek: Fazy  $\text{CsPbI}_3$  [2]

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne –  
na jakim  
etapie techn-  
ologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

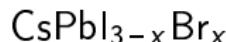
Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D /3D

Perowskity  
halogenkowe

Perowskity  $\text{CsPbCl}_3$  oraz  $\text{CsPbBr}_3$  są stabilniejsze, ale mają wyższą przerwę energetyczną, przez co mniej się nadają w zastosowaniu do ogniw fotowoltaicznych. Można spróbować częściowego podstawienia.



Podwyższona wartość przerwy energetycznej perowskitów takich jak  $\text{CsPbI}_2\text{Br}$  oraz zwiększena stabilność może być wykorzystana w ogniwach tandemowych.

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne –  
na jakim  
etapie tech-  
nologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

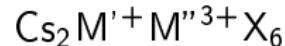
Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D /3D

Perowskity  
halogenkowe

Alternatywą jest podstawienie innego metalu w miejsce Pb. Ma to dodatkową zaletę zmniejszenia ilości ołowiu. Przykładowo  $\text{Sn}^{2+}$ ; utlenia się do  $\text{Sn}^{4+}$ , ale tworzy  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$ .

## Podwójny perowskit



Teoretycznie  $\text{Cs}_2\text{AgInBr}_6$  może osiągnąć wydajność 28%. W praktyce sprawność nie przekracza kilku procent.

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne –  
na jakim  
etapie tech-  
nologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D / 3D

Perowskity  
halogenkowe

Podmiana części Cs na inny metal może zwiększyć stabilność i wydajność. Przykładowo  $Cs_{0.99}Rb_{0.01}PbI_2Br$  osiągnął rekordową sprawność 17,16%.

# Bibliography

Perowskitowe  
ogniwa  
słoneczne –  
na jakim  
etapie tech-  
nologicznym  
jesteśmy?

Rafał  
Staroszczyk

Struktura  
perowskitu

Zastosowanie  
perowskitów

Perowskity  
halogenkowe

Stabilność  
strukturnalna  
perowskitów 3D

Perowskit  
quasi-2D

Ruddlesden-  
Popper (R-P)

Dion-Jacobson  
(D-J)

Alternating  
Cation in  
Interlayer space  
(ACI)

Ognisko quasi-2D

Ognisko  
hybrydowe  
2D /3D

Perowskity  
halogenkowe

- [1] A. Rogalski i in. „The Perovskite Optoelectronic Devices – A Look at the Future”. W: *Small Methods* (2024).
- [2] T. Miyasaka. *Perovskite Photovoltaics and Optoelectronics*. 2022.
- [3] L. Ding. *Perovskite Materials and Devices*. 2022.