

УДК 53
EDN: SBRJNR

PACS: 33.20.-t

**Сравнительный анализ спектров поглощения света в пленках
фталоцианина цинка на разных подложках**

© С. И. Расмагин*, В. И. Красовский

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия***E-mail: rasmus123@yandex.ru**Статья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 8.12.2025; принята к публикации 20.02.2026**Шифр научной специальности: 1.3.11*

Созданы пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на различных подложках методом вакуумного напыления. Проведены оптические исследования полученных пленок, в ходе которых измерены их электронные спектры поглощения. Анализ характеристик электронных спектров поглощения показал зависимость свойств пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка от природы подложек. Установлено, что кристаллическая форма пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на поверхностях органического и неорганического материала имеет, соответственно, метастабильную α -фазу и стабильную β -фазу. Выявлено значительное влияние взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек на свойства пленок. Для возможного применения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка в качестве активного элемента в газовых сенсорах необходимо учитывать природу взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек.

Ключевые слова: фталоцианин цинка, пленки, стекло, поливинилхлорид, спектр поглощения, молекулярные орбитали.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-81-86

Введение

Оптические и электрофизические свойства неорганических полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия и др.) исследованы достаточно хорошо. Большая часть приборов микроэлектроники базируется именно на перечисленных выше неорганических полупроводниках. Для анализа свойств неорганических полупроводников разработана зонная теория, которая вполне приемлемо описывает электронный спектр электронов в периодическом потенциале кристалла [1]. Наряду с неорганическими полупроводниками широко используются органические полупроводники в таких областях, как солнечные элементы, газовые сенсоры, дисплеи, биосенсоры

и т. д. Для анализа оптических и электрофизических свойств органических полупроводников разработана теория молекулярных орбиталей, которая в той или иной степени приближения описывает энергетические состояния (пространственное распределение и энергию электрона), типы молекулярных орбиталей, форму органических молекул и т. д.

К органическим полупроводникам, в частности, относятся фталоцианины металлов с сопряженными углерод-углеродными и азот-углеродными связями. Фталоцианины металлов, как в растворах, так и виде пленок, в настоящее время находят незначительное применение в солнечных элементах [2, 3, 4] и газовых сенсорах [5, 6, 7]. В молекулах фталоцианинов металлов вместо атомов водорода

в бензольных кольцах могут использоваться атомы фтора, хлора, бутильные группы и другие заместители. Например, были исследованы характеристики фталоцианинов цинка с различными заместителями атомов водорода в бензольных кольцах [8, 9]. Оптические свойства пленок фталоцианинов металлов также сильно зависят от природы подложек, на которых они создаются [10]. В частности, пленки фталоцианина цинка способны проявлять полупроводниковые свойства [11].

В данной работе были созданы и исследованы образцы органического полупроводника бутилзамещенного фталоцианина цинка. Все образцы были получены методом вакуумного напыления на разные подложки. В качестве подложек были использованы неорганический материал (силикатное стекло) и органическое вещество (термообработанный поливинилхлорид). Целью данной работы являлось исследование влияния органической и неорганической подложек на характеристики спектров поглощения в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка и их полиморфические свойства.

Экспериментальная часть

Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка были получены методом термического вакуумного напыления. Порошок в форме игольчатых кристаллитов бутилзамещенного фталоцианина цинка был исходным материалом, а в качестве мишени (подложки) использовали силикатное стекло и термообработанный поливинилхлорид (сополимер поливинилхлорид-полиацетилен). Химическую формулу бутилзамещенного фталоцианина цинка с 8 бутильными группами вместо атомов водорода в бензольных кольцах можно записать в виде ZnPcBu_8 , здесь символ Pс обозначает комплекс $\text{C}_{32}\text{H}_8\text{N}_8$, Bu – обозначения бутила C_4H_9 . Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на стекле и на пленке поливинилхлорид-полиацетилен (ПВХ-ПАЦ) обозначили, соответственно, как ZnPcBu_8 – SG и ZnPcBu_8 – PVC-PAC. Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на пленке ПВХ-ПАЦ и на силикатном стекле были получены в процессе сублимации порошка ZnPcBu_8 при температуре нагрева 380°C в течение 10 мин.

Кристаллические структуры пленок ZnPcBu_8 существуют в основном в двух формах: в метастабильной α -форме и стабильной β -форме. На кристаллическую структуру пленок металлфталоцианинов оказывают влияние несколько параметров осаждения, в том числе материал подложки. В данной работе исследовалось влияние материала подложки на кристаллическую структуру пленок ZnPcBu_8 .

Создание пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на подложках выполнялось в вакуумной установке ВУП-5. Спектры поглощения света в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка получены на спектрометре Option Optics 2000 с динамическим диапазоном 300–1100 нм. В качестве источника излучения использовали вольфрамовую лампу мощностью 10 МВт.

Результаты и их обсуждение

Для пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на силикатном стекле и на поверхности ПВХ-ПАЦ были измерены спектры поглощения излучения при температуре измерения $T = 22^\circ\text{C}$ (рисунок).

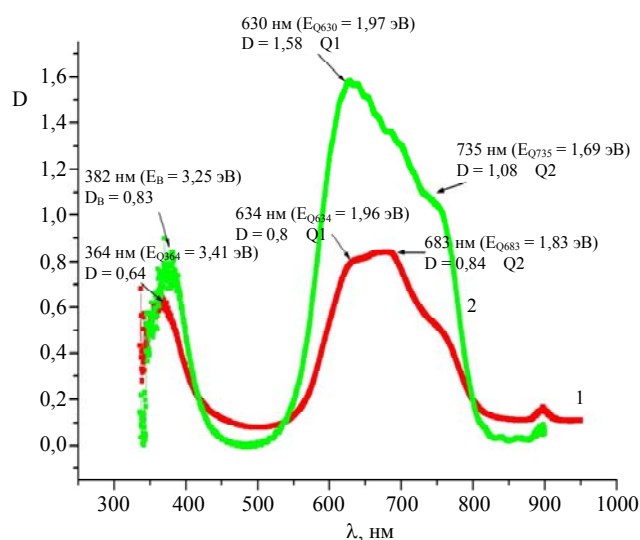


Рис. Спектры поглощения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка: 1 – пленка ZnPcBu_8 на стекле, 2 – пленка ZnPcBu_8 на ПВХ-ПАЦ

Спектр поглощения пленки ZnPcBu_8 – SG имеет две характерные полосы в видимом диапазоне излучения: Q-полоса в диапазоне 550–800 нм и В-полоса в диапазоне 350–500 нм. На спектре поглощения В-полоса имеет один

пик поглощения, а Q-полоса имеет два пика поглощения. Первый пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q1} = 634$ нм ($E_{Q1} = 1,96$ эВ), второй пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q2} = 683$ нм ($E_{Q2} = 1,83$ эВ). Полуширина Q-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{Q1/2} = 170$ нм. Пик В-полосы соответствует длине волны $\lambda_B = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ). Полуширина В-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{B1/2} = 64$ нм.

Спектр поглощения пленки ZnPcBu_8 – PVC-PAC имеет две характерные полосы поглощения: Q-полоса в диапазоне 500–850 нм и В-полоса в диапазоне 350–500 нм. На спектре поглощения В-полоса имеет один пик поглощения, а Q-полоса имеет два крайних пика поглощения (см. рисунок). Первый пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q1} = 630$ нм ($E_{Q1} = 1,97$ эВ), второй пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q2} = 735$ нм ($E_{Q2} = 1,69$ эВ). Полуширина Q-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{Q1/2} = 188$ нм. Пик В-полосы соответствует длине волны $\lambda_B = 382$ нм ($E_B = 3,25$ эВ). Полуширина В-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{B1/2} = 57$ нм или в единицах энергии $\Delta E_{B1/2} = 0,51$ эВ.

Молекулы бутилзамещенного фталоцианина цинка в пленках ZnPcBu_8 – SG и ZnPcBu_8 – PVC-PAC создают молекулярные кристаллиты благодаря Ван-дер-Ваальсовым силам притяжения и отталкивания на близком расстоянии. Между ионами Zn^{2+} разных молекул ZnPcBu_8 действуют силы Кулона на более дальнем расстоянии. Взаимодействие молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка в пленках ZnPcBu_8 – SG и ZnPcBu_8 – PVC-PAC происходит благодаря Ван-дер-Ваальсовым силам на ближнем расстоянии порядка 0,35 нм и Кулоновским силам на дальнем расстоянии порядка 0,38 нм для α -фазы и, соответственно, на ближнем расстоянии 0,32 нм и на дальнем расстоянии 0,49 нм для β -модификации ZnPcBu_8 .

Молекула бутилзамещенного фталоцианина цинка имеет 38 делокализованных π -электронов. В макрокольце ZnPcBu_8 находятся 18 делокализованных π -электронов и 20 делокализованных π -электронов находятся в 4-х изоиндольных группах. Делокализованные π -электроны молекулы ZnPcBu_8 при поглощении света переходят из основного в возбужденные электронные состояния. Для спектров поглощения

в пленках ZnPcBu_8 – SG и ZnPcBu_8 – PVC-PAC полосе Q соответствует синглет-синглетный электронный переход $S_0 \rightarrow S_1$, для полосы В соответствует синглет-синглетный электронный переход $S_0 \rightarrow S_2$. Для молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка характерна точечная группа симметрии D_{4h} , которой соответствует плоская квадратная пространственная структура. Молекулярные орбитали молекулы бутилзамещенного фталоцианина цинка с точечной группой симметрии D_{4h} характеризуются симметрией молекулярных орбиталей a_{1u} , a_{2u} , b_{1u} , b_{2u} , e_g . Поглощение излучения света в Q-полосе пленках ZnPcBu_8 – SG и ZnPcBu_8 – PVC-PAC происходит на сопряженных двойных углерод-углеродных связях бензольных колец ($n = 13$) и сопряженных двойных азот-углеродных связях ($m = 6$) в макрокольце. Здесь обозначили n как число сопряженных двойных углерод-углеродных связей $C=C$ и m как число сопряженных двойных углерод-азотных связей $C=N$. Согласно теории Давидова в кристаллических структурах фталоцианинов металлов (MPc) расщепление Q-полосы на два пика вызвано взаимодействием молекул MPc между собой (диполь-дипольное взаимодействие соседних молекул). Степень расщепления Q-полосы на два пика характеризует энергию взаимодействия между молекулами MPc, которые находятся в положениях с различной группой симметрии [12]. В пленке ZnPcBu_8 – SG на спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два пика: пик поглощения Q1 $\lambda_m = 634$ нм ($E = 1,96$ эВ) и пик поглощения Q2 $\lambda_m = 683$ нм ($E = 1,82$ эВ) (см. рисунок). При этом дважды вырожденная молекулярная орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$ расщепляется на две молекулярные орбитали LUMO+1 и LUMO-1. Пик поглощения Q1 ($E = 1,96$ эВ) соответствует электронному переходу с HOMO $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO+1, а пик поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ) соответствует электронному переходу с HOMO $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO-1. Из рисунка видно, что оптическая плотность D высокоэнергетического пика Q1 ($E = 1,96$ эВ) меньше, чем D низкоэнергетического пика поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ). Такое соотношение оптических плотностей в спектре поглощения показывает, что расположение молекул фталоцианина цинка в пленке ZnPcBu_8 – SG находится в стабильной β -фазе

[13, 14, 15]. Отметим, что пики Q1 ($\lambda_m = 634$ нм) и Q2 ($\lambda_m = 683$ нм) спектров поглощения пленки ZnPcBu_8 практически совпадают с пиками 632 и 689 нм пленки ZnPc в статье [15]. Это может свидетельствовать о том, что в пленке ZnPcBu_8 в β -фазе замена атомов водорода в бензольных кольцах на бутильную группу практически не изменяет энергию электронных переходов в Q-полосе. Пик поглощения В-полосы с длиной волны $\lambda_m = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ) вызван электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО-1 $1a_{2u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$. Стоит отметить, что пик поглощения В-полосы $\lambda_m = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ) пленки ZnPcBu_8 отличается от пика поглощения В-полосы $\lambda_m = 340$ нм ($E_B = 3,65$ эВ) пленки ZnPc в статье [15] на 24 нм (или на 0,24 эВ). Это свидетельствует о том, что замена атомов водорода в бензольных кольцах на бутильные группы увеличивает энергию электронных переходов в В-полосе на 0,24 эВ. Можно предположить, что электронный переход НОМО-1 $1a_{2u}(\pi) \rightarrow$ LUMO $1e_g(\pi^*)$ в пленке ZnPcBu_8 в сравнении с пленкой ZnPc происходит на более низкий колебательный уровень молекулярной орбитали $1e_g(\pi^*)$.

В пленке $\text{ZnPcBu}_8 - \text{PVC-PAC}$ на спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два крайних пика: пик поглощения Q1 $\lambda_m = 630$ нм ($E = 1,97$ эВ) и пик поглощения Q2 $\lambda_m = 738$ нм ($E = 1,68$ эВ) (см. рисунок). Следовательно, дважды вырожденная молекулярная орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$ при взаимодействии между собой молекул ZnPcBu_8 расщепляется на две молекулярные орбитали LUMO+1 и LUMO-1. Пик поглощения Q1 ($E = 1,97$ эВ) соответствует электронному переходу с НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO+1, а пик поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ) соответствует электронному переходу с НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO-1. Из рисунка видно, величина оптической плотности D высокоэнергетического пика Q1 ($E = 1,97$ эВ) больше, чем D низкоэнергетического пика поглощения Q2 ($E = 1,69$ эВ). Такое соотношение оптических плотностей показывает, что молекулы фталоцианина цинка в пленке $\text{ZnPcBu}_8 - \text{PVC-PAC}$ находится в метастабильной α -фазе [13, 14, 15].

Таким образом, кристаллическая форма бутилзамещенного фталоцианина цинка на

поверхностях ПВХ-ПАЦ и силикатного стекла имеет, соответственно, метастабильную α -фазу и стабильную β -фазу. Разный полиморфизм кристаллических пленок ZnPcBu_8 оказывает заметное влияние на характеристики спектров поглощения пленок. Отметим, что для создания газовых сенсоров на основе бутилзамещенного фталоцианина цинка, напыленного на неорганические и органические подложки, необходимо учитывать природу взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек.

Заключение

Было проведено исследование влияния органической (поливинилхлорид-полиацетилен) и неорганической (силикатное стекло) подложек на полиморфизм пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка. Было выявлено влияние полиморфизма бутилзамещенного фталоцианина цинка на характеристики спектров поглощения света. Было установлено влияние полиморфизма на электронные переходы в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка.

В результате проведенного анализа спектров поглощения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на органических и неорганических подложках пришли к следующим заключениям:

1. В кристаллических пленках $\text{ZnPcBu}_8 - \text{PVC-PAC}$ в α -фазе и $\text{ZnPcBu}_8 - \text{SG}$ в β -фазе в спектрах поглощения Q-полоса расщепляется на два основных пика. Высокоэнергетический пик Q1 обуславливается электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO+1 с энергией $E_{Q1} = 1,97$ эВ. Низкоэнергетический пик Q2 обусловлен электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO-1 с энергией $E_{Q2} = 1,69$ эВ.

2. В кристаллической пленке $\text{ZnPcBu}_8 - \text{SG}$ в β -фазе в спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два основных пика. Высокоэнергетический пик Q1 обуславливается электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь

LUMO+1 с энергией $E_{Q1} = 1,96$ эВ. Низкоэнергетический пик Q2 обусловлен электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO-1 с энергией $E_{Q2} = 1,83$ эВ.

3. Для пленки $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе энергия $E_{Q2-\beta}$ электронного перехода НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow$ LUMO-1 больше, чем энергия $E_{Q2-\alpha}$ в пленке $ZnPcBu_8$ – PVC-PAC в α -фазе на 0,14 эВ. Вероятней всего, электронный переход в пленке $ZnPcBu_8$ в α -фазе происходит на более низкоэнергетический колебательный уровень в сравнении с пленкой $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе. Можно также предположить, что энергетический уровень LUMO-1 зависит от кристаллической формы пленок и, следовательно, от природы подложки.

4. Энергия электронных переходов для пиков спектров поглощения В-полосы молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка отличается для разных подложек. Для пленки $ZnPcBu_8$ – PVC-PAC в α -фазе энергия электронного перехода $1a_{2u}(\pi) \rightarrow 1e_g(\pi^*)$ В-полосы составляет $E_{B-\alpha} = 3,25$ эВ. Для пленки $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе энергия электронного перехода $1a_{2u}(\pi) \rightarrow 1e_g(\pi^*)$ В-полосы составляет $E_{B-\beta} = 3,41$ эВ. Для пленки $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе энергия электронного перехода $E_{B-\beta} = 3,41$ эВ превышает энергию $E_{B-\alpha}$ для пленки $ZnPcBu_8$ – PVC-PAC в α -фазе на 0,07 эВ.

Таким образом, подведем общие результаты исследований оптических пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на разных подложках.

1. Для пленок $ZnPcBu_8$ – PVC-PAC в α -фазе и $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе энергии электронных переходов НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow$ LUMO+1, характерные для высокоэнергетического пика спектров поглощения Q-полосы, практически не зависят от кристаллической формы пленок и, следовательно, опосредованно через полиморфизм пленок не зависят от природы подложки.

2. Для пленок $ZnPcBu_8$ – PVC-PAC в α -фазе и $ZnPcBu_8$ – SG в β -фазе энергии электронных переходов НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow$ LUMO-1 характерные для низкоэнергетического пика спектров поглощения Q-полосы зависят от кристаллической формы пленок и, следовательно, опосредованно через кристаллическую форму пленок зависят от природы подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977.
2. Sekar N., Ghelot V. / Resonance. 2010. Vol. 15. P. 819–831. <https://doi.org/10.12691/pmc-3-1-1>
3. Расмагин С. И. / Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 12. С. 1893–1898. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54097.3602-22>
4. Walter M. G., Rudine A. B., Wamser C. C. / JPP. 2010. Vol. 14. P. 759–792.
5. Debliquy M., Lahem D., Bueno-Martinez A., Caucheteur C. / Sensors. 2018. Vol. 18. № 3. P. 740. <https://doi.org/10.3390/s18030740>
6. Bohrer F. I., Colesniuc C. N., Park J., Ruidiaz M. E., Schuller I. K., Kummel W. C., Trogler W. C. / Am. Chem. Soc. 2009. Vol. 131. P. 478–485.
7. Расмагин С. И. / Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 6. С. 591–596. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.06.58635.6787-24>
8. Могилева Т. Н., Ангелов И. П., Мантарева В. Н., Енева И. З., Михеев Г. М. / Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 2. С. 281–287.
9. Chaidogiannos G., Petraki F., Glezos N., Kennou S., Nešpůrek S. / Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 2009. Vol. 96. P. 763–767.
10. Sindu Louis J., Lehmann D., Friedrich M., Zahn D. R. T. / J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 013503. <https://doi.org/10.1063/1.2403845>
11. Guillaud G., Simon J. P. / Coordination Chemistry Reviews. 1998. Vol. 178. P. 1433–1484.
12. Davydov A. S. Theory of molecular excitons. – New York: McGraw-Hill, 1962.
13. Roy D., Das N. M., Shakti N. M., Gupta P. S. / RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 42514–42522. <https://doi.org/10.1039/C4RA05417B>
14. Shahiduzzaman M., Horikawa T., Hirayama T., Nakano M., Karakawa M., Takahashi K., Nunzi J.-M., Taima T. / J. Phys. Chem. C. 2020. Vol. 124. P. 21338–21345. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c07010>
15. Zanjolim A. A., Volpati D., Olivati C. A., Job A. E., Constantino C. J. L. / J. Phys. chem. 2010. Vol. 114. P. 12290–12299.

Comparative analysis of absorption spectra in zinc phthalocyanine films on different substrates

S. I. Rasmagin* and V. I. Krasovskii

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: rasmus123@yandex.ru

Received 27.10.2025; revised 8.12.2025; accepted 20.02.2026

Films of butyl-substituted zinc phthalocyanine were fabricated on various substrates using vacuum deposition. Optical studies of the resulting films were conducted, during which their electronic absorption spectra were measured. Analysis of the characteristics of the electronic absorption spectra revealed a dependence of the properties of the butyl-substituted zinc phthalocyanine films on the nature of the substrates. It was established that the crystalline form of butyl-substituted zinc phthalocyanine films on the surfaces of organic and inorganic materials exhibits a metastable α -phase and a stable β -phase, respectively. Further research revealed a significant influence of the interaction between butyl-substituted zinc phthalocyanine molecules and substrate molecules on the film properties. For the potential use of butyl-substituted zinc phthalocyanine films as an active element in gas sensors, it is necessary to consider the nature of the interaction between butyl-substituted zinc phthalocyanine molecules and substrate molecules.

Keyword: zinc phthalocyanine, films, glass, polyvinyl chloride, absorption spectrum, molecular orbitals.

REFERENCES

1. Bonch-Bruevich V. L. and Kalashnikov S. G. Semiconductor Physics. Moscow, Nauka, 1977 [in Russian].
2. Sekar N. and Ghelot V., Resonance **15**, 819–831 (2010). <https://doi.org/10.12691/pmc-3-1-1>
3. Rasmagin S. I., Optics and Spectroscopy **130** (12), 1893–1898 (2022). <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54097.3602-22>
4. Walter M. G., Rudine A. B., and Wamser C. C., JPP **14**, 759–792 (2010).
5. Debliquy M., Lahem D., Bueno-Martinez A., and Caucheteur C., Sensors **18** (3), 740 (2018). <https://doi.org/10.3390/s18030740>
6. Bohrer F. I., Colesniuc C. N., Park J., Ruidiaz M. E., Schuller I. K., Kummel W. C., and Trogler W. C., Am. Chem. Soc. **131**, 478–485 (2009).
7. Rasmagin S. I., Optics and Spectroscopy **132** (6), 591–596 (2024). <https://doi.org/10.61011/OS.2024.06.58635.6787-24>
8. Mogileva T. N., Angelov I. P., Mantareva V. N., Eneva I. Z., and Mikhchev G. M., Chemical Physics and Mesoscopy **18** (2), 281–287 (2016).
9. Chaidogiannos G., Petraki F., Glezos N., Kennou S., and Nešpůrek S., Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. **96**, 763–767 (2009).
10. Sindu Louis J., Lehmann D., Friedrich M., and Zahn D. R. T., J. Appl. Phys. **101**, 013503 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2403845>
11. Guillaud G. and Simon J. P., Coordination Chemistry Reviews **178**, 1433–1484 (1998).
12. Davydov A. S. Theory of molecular excitons. New York, McGraw-Hill, 1962.
13. Roy D., Das N. M., Shakti N. M., and Gupta P. S., RSC Adv. **4**, 42514–42522 (2014). <https://doi.org/10.1039/C4RA05417B>
14. Shahiduzzaman M., Horikawa T., Hirayama T., Nakano M., Karakawa M., Takahashi K., Nunzi J.-M., and Taima T., J. Phys. Chem. C **124**, 21338–21345 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c07010>
15. Zanolini A. A., Volpati D., Olivati C. A., Job A. E., and Constantino C. J. L., J. Phys. Chem. **114**, 12290–12299 (2010).

Об авторах

Расмагин Сергей Иосифович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: rasmus123@yandex.ru SPIN-код: 8350-5100, AuthorID: 41958

Красовский Виталий Иванович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: krasovskii@nsc.gpi.ru SPIN-код: 8116-4994, AuthorID: 41957