

01  
**Рекомбинация носителей заряда в пленках CsPbBr<sub>3</sub> с высокой квантовой эффективностью фотолюминесценции**

© А.С. Полушкин,<sup>1</sup> С.В. Макаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Центр инноваций и развития в Циндао, Харбинский инженерный университет,  
266000 Циндао, Шаньдун, Китай  
e-mail: s.makarov@metalab.ifmo.ru

Поступило в Редакцию 22 мая 2024 г.

В окончательной редакции 15 июля 2024 г.

Принято к публикации 16 июля 2024 г.

Рассмотрены тонкие пленки перовскита, полученные двумя разными методами: масштабируемым методом горизонтальной щелевой экструзии и классическим методом центрифугирования. Для моделирования рекомбинации носителей заряда в этих пленках использована зарекомендовавшая себя ABC-модель, которая позволяет определить константы рекомбинации на основе затухания фотолюминесценции и квантовый выход фотолюминесценции. Кроме того, данные были проанализированы при разных мощностях накачки, что позволило получить константы рекомбинации с более высокой точностью.

**Ключевые слова:** галогенидные перовскиты, щелевая экструзия, затухание фотолюминесценции, ABC-модель.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58854.189-24

## Введение

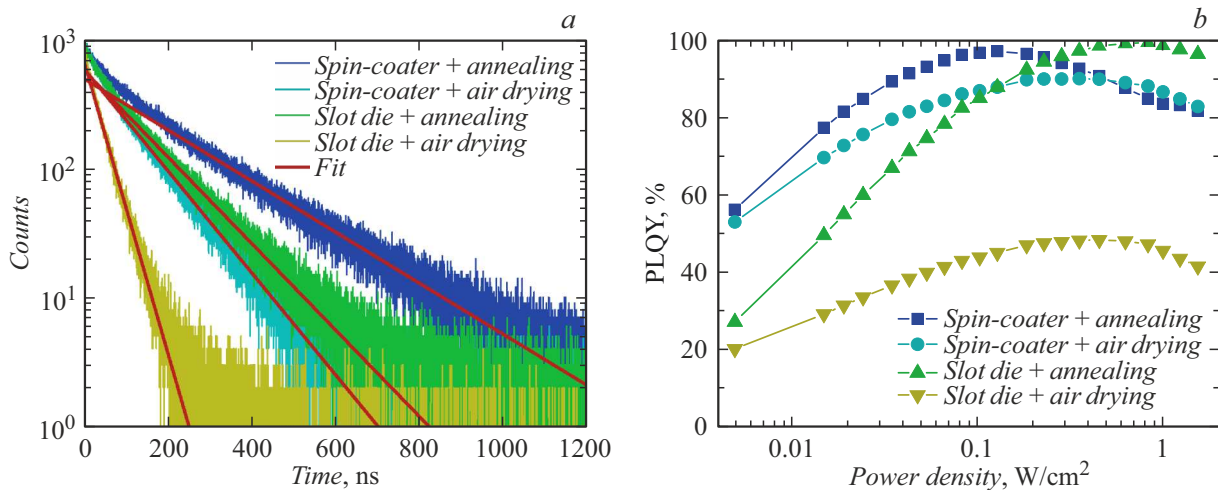
Свинцово-галогенидные перовскиты — это класс полупроводниковых материалов с очень привлекательными свойствами для оптоэлектроники [1,2]. Они вызывают большой интерес ученых, поскольку позволяют исследовать различные явления в структурах на их основе [3–6]. Высокий квантовый выход фотолюминесценции и ее устойчивость к дефектам перовскитов позволяют использовать растворные методы для создания тонкопленочных светоизлучающих устройств на их основе [7–8]. Высокий показатель преломления и выраженный экситонный резонанс при комнатной температуре делают перовскиты перспективным материалом для создания фотонных структур и лазеров [11–14]. Кроме того, перовскиты используются для создания солнечных элементов [15–17], фотодетекторов [18–19], транзисторов [20] и газовых сенсоров [21–23].

Начиная с 2014 года, было продемонстрировано множество различных светоизлучающих устройств на основе перовскитов [24–27]. Кроме того, перовскитные материалы могут использоваться для создания дисплеев не напрямую, а лишь в качестве усилителей яркости цветов и подсветки [28]. Однако большинство полученных перовскитных устройств создаются и работают только в лабораторных условиях, для перехода к коммерческому применению перовскитных светодиодов требуется много дополнительных исследований по оптимизации долгосрочной стабильности и масштабированию [29]. Таким образом, разработка масштабируемых методов нанесения тонких пленок перовскита является неотъемлемым

шагом в процессе коммерциализации перовскитных светоизлучающих устройств [30,31].

В недавней работе был успешно представлен метод создания светоизлучающих электрохимических ячеек на основе перовскита с использованием горизонтальной щелевой экструзии и сушки горячим воздухом [32]. В ходе исследования была изучена морфология и оптические свойства композитных пленок, содержащих перовскитные нанокристаллы, полученные различными способами. Были проведены измерения квантового выхода фотолюминесценции и ее затухания у пленок перовскита CsPbBr<sub>3</sub> с полиэтиленоксидом. Несмотря на то, что кинетика фотолюминесценции в перовскитах такого состава недавно была уже исследована [33], детального исследования рекомбинации носителей заряда в пленках с более крупным размером зерен и полученных с использованием масштабируемого метода не проводилось.

В настоящей работе разрабатывается модель, описывающая процесс рекомбинации носителей заряда в пленках CsPbBr<sub>3</sub>, полученных методом горизонтальной щелевой экструзии. В первую очередь, поставлена цель определить коэффициенты излучательной и безызлучательной рекомбинации, основываясь на кинетике затухания фотолюминесценции. На основе этих коэффициентов становится возможным проведение расчета квантового выхода фотолюминесценции и сравнение с полученными ранее экспериментальными значениями. Результаты моделирования будут полезны для исследователей, работающих как в области перовскитных светодиодов, так и в смежных областях, где качество перовскита CsPbBr<sub>3</sub> имеет ключевое значение.



**Рис. 1.** *a* — экспериментальное [32] затухание фотолуминесценции пленок CsPbBr<sub>3</sub>, полученные разными методами, при накачке в  $0.1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  (зашумленные линии), и затухание фотолуминесценции, полученное в настоящей работе приближением (3) (красные прямые), *b* — зависимость квантового выхода фотолуминесценции пленок CsPbBr<sub>3</sub>, полученные разными методами, от мощности накачки [32].

## 1. Результаты

В предыдущей работе [32] нами были экспериментально исследованы четыре типа пленок из композита перовскита CsPbBr<sub>3</sub> с полиэтиленоксидом. Пленки были получены разными методами печати: две из них были созданы методом центрифугирования с одновременной сушкой горячим воздухом и без нее, а затем были подвергнуты отжигу при температуре 200°C. Еще две пленки были получены методом горизонтальной щелевой экструзии с одновременной сушкой воздухом или без нее, а затем также были отожжены. Мы изучили морфологию пленок и их оптические свойства. Для всех пленок была получена зависимость затухания фотолуминесценции от времени и зависимость квантового выхода фотолуминесценции от мощности накачки (рис. 1). Однако рекомбинация носителей заряда в данных пленках не была подробно рассмотрена. Теоретическая модель, которая описала бы кинетику носителей заряда в перовскитной пленке на основе времяразрешенной спектроскопии фотолуминесценции, могла бы быть использована для оценки квантового выхода фотолуминесценции [34].

Для описания рекомбинации носителей заряда можно использовать упрощенную модель ABC [35]. Хотя эта модель не всегда подходит для любых галогенидных перовскитов, она все же достаточно адекватна при низких концентрациях носителей заряда [36]. Рассмотрим тонкую пленку из перовскита на стеклянной подложке, которая подвергается воздействию ультракороткого лазерного импульса. Под действием фотонов образуются электронно-дырочные пары, при этом концентрация дырок равна концентрации электронов, а диффузия носителей заряда в подложку отсутствует. В таком случае концентрацию электронов  $n$  можно рассчитать

по следующей формуле:

$$-\frac{dn}{dt} = An + Bn^2 + Cn^3. \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое отвечает за безызлучательную рекомбинацию на дефектах (Шокли–Рида–Холла), второе слагаемое отвечает за излучательную рекомбинацию, и третье слагаемое отвечает за оже-рекомбинацию. При малых концентрациях носителей, т.е. меньше  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , оже-рекомбинацией в перовскитах можно пренебречь [37], третье слагаемое очень мало по сравнению с первыми двумя, таким образом, именно такие малые концентрации (т.е. малые мощности накачки) и будут рассматриваться. Более того, модель можно упростить еще больше, если мощность накачки настолько мала, что первое слагаемое в уравнении (1) значительно превосходит второе, тогда можно также пренебречь коэффициентом  $B$ , и уравнение (1) превращается в простое дифференциальное уравнение

$$\frac{dn}{dt} = -An. \quad (2)$$

Решая это уравнение, получаем

$$n(t) = n_0 \exp(-At) = n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где  $n_0$  — концентрация электронов при  $t = 0$ ,  $\tau = 1/A$  — время жизни носителей заряда при малой концентрации или время Шокли–Рида–Холла. На рис. 1, *a* представлены кривые затухания фотолуминесценции четырех перовскитных пленок. Образец 1 — пленка, полученная центрифугированием без сушки горячим воздухом. Образец 2 — получен центрифугированием с сушкой. Образцы 3 и 4 получены горизонтальной щелевой экструзией без сушки и с сушкой

**Таблица 1.** Время жизни Шокли–Рида–Холла для пленок CsPbBr<sub>3</sub>

Образец	$\tau$ , ns
1	180
2	101
3	113
4	35

соответственно. Итак, из этих кривых по формуле (3) можно оценить  $\tau$  для всех образцов. Красными линиями показана аппроксимация затухания фотолюминесценции по формуле (3). В табл. 1 представлены времена жизни электронов, полученные таким образом.

Поскольку затухание фотолюминесценции на рис. 1, *a* приведено в логарифмическом масштабе, экспоненциальное убывание по формуле (3) должно выглядеть как прямая. Для образца 4 затухание действительно выглядит как прямая, однако для образца 1 видно расхождение аппроксимации с экспериментом возле начального момента времени. Это связано с бимолекулярной излучательной рекомбинацией электронов и дырок, а значит, пренебрегать коэффициентом  $B$  для этого образца нельзя даже на столь малой мощности. Тем более при увеличении мощности накачки пренебрегать вторым слагаемым в уравнении (1) будет нельзя и для остальных образцов. Тогда нужно решать дифференциальное уравнение

$$-\frac{dn}{dt} = An + Bn^2. \quad (4)$$

Его решение можно записать в следующем виде:

$$n(t) = \frac{An_0 \exp(-At)}{A + Bn_0(1 - \exp(-At))}. \quad (5)$$

Здесь  $n_0 = n(0)$  — концентрация электронов в начальный момент времени. Зная толщину пленок и поглощение перовскита, можно оценить  $n_0$  следующим образом:

$$n_0 = \frac{4\alpha P}{h\nu f \pi d^2 w}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — поглощение пленки,  $P$  — мощность лазера накачки,  $h\nu$  — энергия фотона лазера накачки,  $f$  — частота повторения импульсов,  $\pi d^2/4$  — площадь лазерного пятна, где  $d$  — диаметр пятна и  $w$  — толщина пленки.

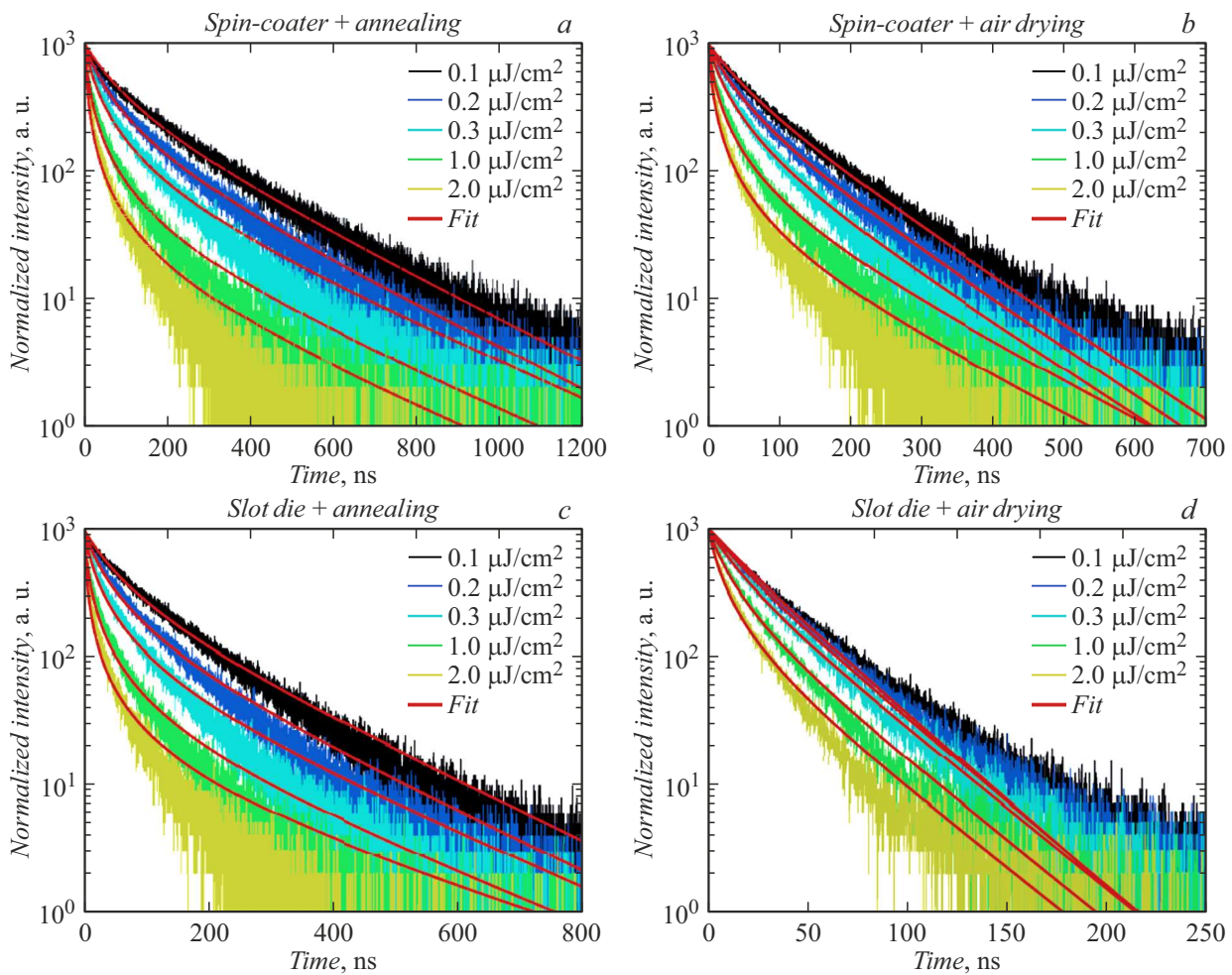
Таким образом, из уравнения (5) можно численно найти коэффициенты  $A$  и  $B$ , используя результаты времязрешенной спектроскопии. На рис. 2 представлены кривые затухания фотолюминесценции при разных плотностях энергии накачки для всех четырех образцов. Аппроксимируя затухание по формуле (5), численно находим  $A$  и  $n_0B$  на разных мощностях накачки. Коэффициент  $A$  зависит от концентрации дефектов в образце, при

**Таблица 2.** Коэффициенты  $A$ , полученные из формулы (5) для всех пленок CsPbBr<sub>3</sub> при разных уровнях накачки

Образец	$F$ , $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	$n_0$ , $\text{cm}^{-3}$	$A$ , $\text{s}^{-1}$
1	0.1	$9.37 \cdot 10^{15}$	$3.76 \cdot 10^6$
	0.2	$1.87 \cdot 10^{16}$	$3.73 \cdot 10^6$
	0.4	$3.75 \cdot 10^{16}$	$3.27 \cdot 10^6$
	1	$9.37 \cdot 10^{16}$	$3.27 \cdot 10^6$
	2	$1.87 \cdot 10^{17}$	$3.18 \cdot 10^6$
2	0.1	$9.86 \cdot 10^{15}$	$8.63 \cdot 10^6$
	0.2	$1.97 \cdot 10^{16}$	$8.63 \cdot 10^6$
	0.4	$3.94 \cdot 10^{16}$	$8.30 \cdot 10^6$
	1	$9.86 \cdot 10^{16}$	$6.78 \cdot 10^6$
	2	$1.97 \cdot 10^{17}$	$6.59 \cdot 10^6$
3	0.1	$1.51 \cdot 10^{16}$	$5.38 \cdot 10^6$
	0.2	$3.03 \cdot 10^{16}$	$5.38 \cdot 10^6$
	0.4	$6.05 \cdot 10^{16}$	$4.89 \cdot 10^6$
	1	$1.51 \cdot 10^{17}$	$4.55 \cdot 10^6$
	2	$3.03 \cdot 10^{17}$	$3.54 \cdot 10^6$
4	0.1	$8.01 \cdot 10^{15}$	$3.12 \cdot 10^7$
	0.2	$1.60 \cdot 10^{16}$	$3.01 \cdot 10^7$
	0.4	$3.20 \cdot 10^{16}$	$2.88 \cdot 10^7$
	1	$8.01 \cdot 10^{16}$	$2.88 \cdot 10^7$
	2	$1.60 \cdot 10^{17}$	$2.83 \cdot 10^7$

увеличении накачки все больше дефектов заполняются электронами и не участвуют в рекомбинации, поэтому коэффициент  $A$  уменьшается с увеличением мощности накачки. В табл. 2 представлены результаты численного расчета коэффициентов  $A$ . Толщина полученных образцов различна, поэтому концентрация носителей заряда отличается в разных пленках на одном уровне энергии накачки. Коэффициент  $B$  связан с вероятностью межзонного перехода, которая определяется материалом и поэтому не зависит ни от образца, ни от мощности накачки. Значение параметра  $B$  в данном приближении составило  $9.82 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$  и согласуется с приведенным в литературе [38]. Значение коэффициента излучательной рекомбинации для монокристаллов CsPbBr<sub>3</sub>, представленное в [39], выше на два порядка, однако получено при криогенных температурах (15 K).

Коэффициент  $A$  отвечает за рекомбинацию на дефектах. По его значению можно качественно оценить концентрацию дефектов в образце: чем больше коэффициент  $A$ , тем выше концентрация дефектов в пленке. Самые низкие значения коэффициента  $A$  были получены для образцов 1 и 3. Это согласуется с результатами экспериментального измерения квантового выхода фотолюминесценции: он был наибольшим для этих образцов (рис. 1, *b*). Образец 4, напротив, имеет наибольший коэффициент  $A$  и, следовательно, более высокую концентрацию дефектов. Поэтому его квантовый выход оказался наименьшим. Можно количественно оценить концентрацию дефектов лучших образцов (1 и 3) аналогично



**Рис. 2.** Экспериментальное [32] затухание фотолюминесценции и ее приближение по формуле (5) для пленок CsPbBr<sub>3</sub> при разных плотностях энергии накачки для пленок, полученных: *a* — центрифугированием без сушки, *b* — центрифугированием с сушкой, *c* — экструзией без сушки и *d* — экструзией с сушкой.

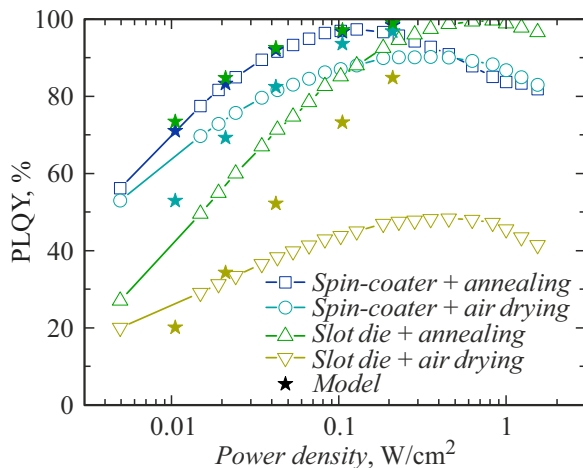
тому, как это делается в CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> перовскитных пленках [40]. Тогда концентрация дефектов получается  $3.05 \cdot 10^{15}$  и  $3.40 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (при накачке  $2 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) соответственно, что совпадает с полученными ранее концентрациями дефектов в пленках CsPbBr<sub>3</sub> и на порядок уступает полученным в нанокристаллах [39,41,42].

Далее, получив коэффициенты *A* и *B* из затухания фотолюминесценции, можно численно оценить значение квантового выхода фотолюминесценции (PLQY). Поскольку PLQY по определению — это число излученных фотонов к общему числу поглощенных фотонов, а число фотонов соотносится с количеством электронов в начальный момент времени и оже-рекомбинацией отсутствует, можно написать:

$$\text{PLQY} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2} = \frac{Bn_0}{A + Bn_0}. \quad (7)$$

Тогда, используя уравнение (7), можно посчитать значение квантового выхода фотолюминесценции и сравнить его с измеренным экспериментально. На рис. 3

представлены результаты измерения PLQY. Полые точки соответствуют результатам экспериментального измерения PLQY в интегрирующей сфере под воздействием непрерывного лазерного диода с длиной волны 405 nm. Сплошные звездочки соответствуют теоретически рассчитанному значению квантового выхода по формуле (7). Как можно заметить, значения квантового выхода, рассчитанные экспериментально и теоретически, существенно различаются. Расхождение этих значений можно объяснить тем, что теоретические точки рассчитаны из результатов времяразрешенной спектроскопии, которая измерялась под воздействием фемтосекундного лазера и частотой повторения 100 kHz, в то время как экспериментальное измерение PLQY проходило под воздействием непрерывного лазера. Под воздействием непрерывного лазера дефекты в материале заполняются электронами и перестают участвовать в рекомбинации, что существенно влияет на квантовый выход. При этом при импульсной засветке образца электроны успевают релаксировать, и большинство дефектов оказывается



**Рис. 3.** Зависимости квантового выхода фотолюминесценции для всех четырех пленок  $CsPbBr_3$  от плотности мощности накачки измеренная экспериментально (соединенные линиями точки [32]) и рассчитанная теоретически (звездочки).

незаполненными и участвует в рекомбинации. Например, для образца, полученного методом центрифугирования без сушки, количество дефектов минимально. Поэтому для него эффект заполнения дефектов не имеет большого значения, и расчет PLQY хорошо согласуется с экспериментально измеренными значениями.

## Заключение

На основе проанализированных экспериментальных данных время разрешенной спектроскопии фотолюминесценции из пленок  $CsPbBr_3$  нами развита модель, которая позволяет рассчитать коэффициенты излучательной ( $B$ ) и безызлучательной ( $A$ ) рекомбинации. Впервые были рассчитаны значения этих коэффициентов для перовскитных пленок, созданных методом горизонтальной щелевой экструзии. Коэффициент  $B$  получился равным  $9.82 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ . Наименьший коэффициент для рекомбинации на дефектах  $A = 3.18 \cdot 10^6$  и  $3.54 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  (при накачке  $2 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) был получен для пленок, полученных без сушки горячим воздухом центрифугированием и горизонтальной щелевой экструзией, что советуется концентрации дефектов  $3.05 \cdot 10^{15}$  и  $3.40 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Такой низкий уровень концентрации дефектов соответствует высокому качеству перовскитов данного типа, которые могут успешно применяться в различных оптоэлектронных устройствах перовскитных пленок [40,41].

Полученная модель эффективно оценивает концентрацию дефектов в образце и позволяет точно предсказывать, какой образец будет обладать наибольшим квантовым выходом фотолюминесценции. Однако при расчете квантового выхода фотолюминесценции на основе полученных коэффициентов рекомбинации, результаты не всегда совпадают с экспериментальными данными для случаев высокой концентрации дефектов. Тем не менее

разработанная модель может быть использована для быстрой диагностики люминесцентных свойств качественных перовскитных пленок на основе измерения затухания фотолюминесценции.

## Финансирование работы

Анализ время разрешенной фотолюминесценции был выполнен при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 21-73-20189). Анализ мощностных зависимостей квантового выхода фотолюминесценции был выполнен при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 24-79-10131).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P. Docampo, T. Bein. *Accounts Chem. Research*, **49**, 339 (2016).
- [2] J. Liang, J. Liu, Z. Jin. *Solar Rrl*, **1**, 1700086 (2017).
- [3] D.S. Gets, E.Y. Tiguntseva, A.S. Berestennikov, T.G. Lyashenko, A.P. Pushkarev, S.V. Makarov, A.A. Zakhidov. *JETP Lett.*, **107**, 742 (2018).
- [4] A.V. Andrianov, A.N. Aleshin, L. Matyushkin. *JETP Lett.*, **109**, 28 (2019).
- [5] K. Sekerbayev, Y.T. Taurbayev, I.N. Saraeva, S.I. Kudryashov, A.A. Ionin, V.Y. Timoshenko. *JETP Lett.*, **110**, 592 (2019).
- [6] K. Sekerbayev, G. Mussabek, N.S. Pokryshkin, V.G. Yakunin, Y.T. Taurbayev, Y. Shabdan, Z.N. Utegulov, V. Chirvony, V.Y. Timoshenko. *JETP Lett.*, **114**, 447 (2021).
- [7] Y. Wang, C. Duan, P. Lv, Z. Ku, J. Lu, F. Huang, Y.-B. Cheng. *National Science Review*, **8**, b075 (2021).
- [8] J. Kang, L.-W. Wang. *J. Phys. Chem. Lett.*, **8**, 489 (2017).
- [9] X.-K. Liu, W. Xu, S. Bai, Y. Jin, J. Wang, R.H. Friend, F. Gao. *Nature Mater.*, **20**, 10 (2021).
- [10] D. Gets, D. Saranin, A. Ishteev, R. Haroldson, E. Danilovskiy, S. Makarov, A. Zakhidov. *Appl. Surf. Sci.*, **476**, 486 (2019).
- [11] S. Makarov, A. Furasova, E. Tiguntseva, A. Hemmetter, A. Berestennikov, A. Pushkarev, A. Zakhidov, Y. Kivshar. *Adv. Opt. Mater.*, **7**, 1800784 (2019).
- [12] Q. Zhang, Q. Shang, R. Su, T.T.H. Do, Q. Xiong. *Nano Lett.*, **21**, 1903 (2021).
- [13] I. Shishkin, A. Polushkin, E. Tiguntseva, A. Murzin, B. Stroganov, Y. Kapitonov, S.A. Kulinich, A. Kuchmizhak, S. Makarov. *Appl. Phys. Express*, **12**, 122001 (2019).
- [14] A.O. Murzin, B.V. Stroganov, C. Gunnemann, S.B. Hammouda, A.V. Shurukhina, M.S. Lozhkin, A.V. Emeline, Y.V. Kapitonov. *Adv. Opt. Mater.*, **8**, 2000690 (2020).
- [15] J.Y. Kim, J.-W. Lee, H.S. Jung, H. Shin, N.-G. Park. *Chem. Rev.*, **120**, 7867 (2020).
- [16] D. Saranin, P. Gostischev, D. Tatarinov, I. Ermanova, V. Mazov, D. Muratov, A. Tameev, D. Kuznetsov, S. Didenko, A. Di Carlo. *Materials*, **12**, 1406 (2019).

- [17] I. Turkevych, S. Kazaoui, N.A. Belich, A.Y. Grishko, S.A. Fateev, A.A. Petrov, T. Urano, S. Aramaki, S. Kosar, M. Kondo, E.A. Goodilin, M. Graetzel, A.B. Tarasov. *Nature Nanotechnol.*, **14**, 57 (2019).
- [18] W. Tian, H. Zhou, L. Li. *Small*, **13**, 1702107 (2017).
- [19] F. Wang, X. Zou, M. Xu, H. Wang, H. Wang, H. Guo, J. Guo, P. Wang, M. Peng, Z. Wang, Y. Wang, J. Miao, F. Chen, J. Wang, X. Chen, A. Pan, Ch. Shan, L. Liao, W. Hu. *Adv. Sci.*, **8**, 2100569 (2021).
- [20] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, O.P. Chikalova-Luzina, L.B. Matyushkin, M.K. Ovezov, A.M. Ershova, I.N. Trapeznikova, V.N. Petrov. *Synthetic Metals*, **260**, 116291 (2020).
- [21] A.A. Parfenov, O.R. Yamilova, L.G. Gutsev, D.K. Sagdullina, A.V. Novikov, B.R. Ramachandran, K.J. Stevenson, S.M. Aldoshin, P.A. Troshin. *J. Mater. Chem. C*, **9**, 2561 (2021).
- [22] P.V. Shinde, A. Patra, C.S. Rout. *J. Mater. Chem. C*, **10**, 10196 (2022).
- [23] D.I. Markina, S.S. Anoshkin, M.A. Masharin, S.A. Khubezhov, I. Tzibizov, D. Dolgintsev, I.N. Terterov, S.V. Makarov, A.P. Pushkarev. *ACS Nano*, **17**, 1570 (2023).
- [24] Z.-K. Tan, R.S. Moghaddam, M.L. Lai, P. Docampo, R. Higler, F. Deschler, M. Price, A. Sadhanala, L.M. Pazos, D. Credgington, M. Kondo, F. Hanusch, Th. Bein, H.J. Snaith, R.H. Friend. *Nature Nanotechnol.*, **9**, 687 (2014).
- [25] A. Fakharuddin, M.K. Gangishetty, M. Abdi-Jalebi, S.-H. Chin, A.R. bin Mohd Yuso D.N. Congreve, W. Tress, F. Deschler, M. Vasilopoulou, H.J. Bolin. *Nature Electron.*, **5**, 203 (2022).
- [26] M. Alahbakhshi, A. Mishra, R. Haroldson, A. Ishteev, J. Moon, Q. Gu, J.D. Slinker, A.A. Zakhidov. *ACS Energy Lett.*, **4**, 2922 (2019).
- [27] D. Gets, M. Alahbakhshi, A. Mishra, R. Haroldson, A. Papadimitratos, A. Ishteev, D. Saranin, S. Anoshkin, A. Pushkarev, E. Danilovskiy, S. Makarov, J.D. Slinker, A.A. Zakhidov. *Adv. Opt. Mater.*, **9**, 2001715 (2021).
- [28] X.-G. Wu, H. Ji, X. Yan, H. Zhong. *Nature Nanotechnol.*, **17**, 813 (2022).
- [29] T.-H. Han, K.Y. Jang, Y. Dong, R.H. Friend, E.H. Sargent, T.-W. Lee. *Nature Rev. Mater.*, **7**, 757 (2022).
- [30] F.C. Krebs. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **93**, 394 (2009).
- [31] T. Zhang, L. Wang, L. Kong, C. Zhang, H. He, B. Wei, X. Yang. *J. Mater. Chem. C*, **9**, 7532 (2021).
- [32] A. Polushkin, E. Danilovskiy, E. Sapozhnikova, N. Kuzmenko, A. Pushkarev, S. Makarov. *Photon. Nanostructures-Fundamentals and Applications*, **58**, 101232 (2024).
- [33] V. Baitova, M. Knyazeva, I. Mukanov, A. Tarasevich, A. Naumov, A. Son, S. Kozyukhin, I.Y. Eremchev. *JETP Lett.*, **118**, 560 (2023).
- [34] T. Kirchartz, J.A. Marquez, M. Stolterfoht, T. Unold. *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1904134 (2020).
- [35] S. Karpov. *Opt. Quant. Electron.*, **47**, 1293 (2015).
- [36] A. Kiligaridis, P.A. Frantsuzov, A. Yangui, S. Seth, J. Li, Q. An, Y. Vaynzof, I.G. Scheblykin. *Nature Commun.*, **12**, 3329 (2021).
- [37] J.M. Richter, M. Abdi-Jalebi, A. Sadhanala, M. Tabachnyk, J.P. Rivett, L.M. Pazos-Outón, K.C. Gödel, M. Price, F. Deschler, R.H. Friend. *Nature Commun.*, **7**, 13941 (2016).
- [38] P. Ščajev, D. Litvinas, V. Soriutė, G. Kreiza, S. Stanionyte, S. Juršėnas. *J. Phys. Chem. C*, **123**, 23838 (2019).
- [39] J. Peters, Z. Liu, R. Yu, K. McCall, Y. He, M. Kanatzidis, B. Wessels. *Phys. Rev. B*, **100**, 235305 (2019).
- [40] P. Ščajev, S. Miasojedovas, S. Juršėnas. *J. Mater. Chem. C*, **8**, 10290 (2020).
- [41] K. Abiedh, Z. Zaaboub, F. Hassen. *Appl. Phys. A*, **127**, 1 (2021).
- [42] M. Zhang, Z. Zheng, Q. Fu, P. Guo, S. Zhang, C. Chen, H. Chen, M. Wang, W. Luo, Y. Tian. *J. Phys. Chem. C*, **122**, 10309 (2018).