

07

Система оптоэлектронных резервуарных вычислений с модификацией выходного слоя

© Г.О. Даниленко, Д.А. Павлов, Е.А. Викторов, А.В. Ковалев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: avkovalev@itmo.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 8 июня 2025 г.

Принято к публикации 9 июня 2025 г.

Экспериментально исследована система резервуарных вычислений на основе вертикально-излучающего лазера с оптоэлектронной обратной связью. Продemonстрировано влияние способа организации выходного слоя системы на точность решения задачи предсказания хаотического временного ряда Santa Fe.

Ключевые слова: резервуарные вычисления, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронная обратная связь, машинное обучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.17.60969.20345

В настоящее время ведутся активный поиск и исследование новых вычислительных парадигм, в том числе с использованием динамических процессов в аналоговых физических системах. Среди последних отдельно выделяются резервуарные вычисления (РВ) на основе нелинейного устройства с запаздывающей обратной связью (ОС), которые являются аналогом рекуррентной нейронной сети [1–3], организованной посредством временного мультиплексирования с формированием так называемых виртуальных узлов. Системы РВ с запаздывающей ОС были реализованы с использованием оптических [4], электронных [5], мемристорных [6], спинволновых [7] и других устройств [8].

Физическая реализация РВ на основе оптоэлектронных устройств является актуальной научно-технической задачей, решение которой способно привести к появлению высокоскоростных и энергоэффективных систем обработки данных. Ранее была экспериментально продемонстрирована система РВ на основе полупроводникового лазера с запаздывающей оптоэлектронной ОС (ОЭОС) [9], теоретически исследованная в работах [10–12]. Система использует нелинейный отклик, возникающий вследствие возбуждения в лазере релаксационных колебаний при возмущении системы, когда ее параметры находятся в окрестности бифуркации Андронова–Хопфа. В экспериментальной работе [13] рассматривалась похожая система резервуарных вычислений на основе нелинейности ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера и ОЭОС с большим временем запаздывания без использования быстрой динамики лазерного отклика.

В работе [9] наблюдались ограничения производительности обработки данных, обусловленные относительно малыми полосами модуляции лазера и пропускания ОЭОС. Система работает по принципу мультиплексирования виртуальных узлов во времени, что делает важным увеличение полосы модуляции системы для

повышения качества решения вычислительных задач. В настоящей работе представлена система резервуарных вычислений на основе вертикально-излучающего лазера (ВИЛ) с высокой частотой модуляции тока накачки и усовершенствованной петли ОЭОС, включающей в себя полупроводниковый оптический усилитель и электронный тракт с более равномерной и широкой полосой пропускания ОС благодаря использованию эквалайзера и широкополосных усилителей электронного сигнала. Это позволяет использовать большее число виртуальных узлов для решения сложных задач машинного обучения, таких как предсказание хаотического временного ряда Santa Fe [14].

Особенностью РВ является упрощение процесса обучения по сравнению с другими видами нейронных сетей, поскольку в процессе обучения настройке подвергаются только весовые коэффициенты выходного слоя, определяемые с помощью линейной регрессии. В работе [15] было теоретически показано увеличение точности решения задачи предсказания временных рядов системой РВ при использовании в выходном слое помимо значений состояния узлов системы РВ также их значений, возведенных в квадрат. В настоящей работе на основе экспериментальных данных демонстрируется влияние способа организации выходного слоя на точность решения задачи предсказания хаотического временного ряда Santa Fe и предлагается новая процедура обработки значений состояния узлов.

Схема экспериментальной установки системы оптоэлектронных РВ представлена на рис. 1, а. Все оптические компоненты соединяются посредством стандартного одномодового волокна с FC-разъемами, электронные — посредством коаксиальных кабельных сборок с разъемами SMA. В состав системы входит модуль ВИЛ с SMA-разъемом и волоконным выводом (VCSEL, ОКБ „Планета“, длина волны 1550 nm, пороговое значение тока накачки 1.5 mA, выходная мощность излу-

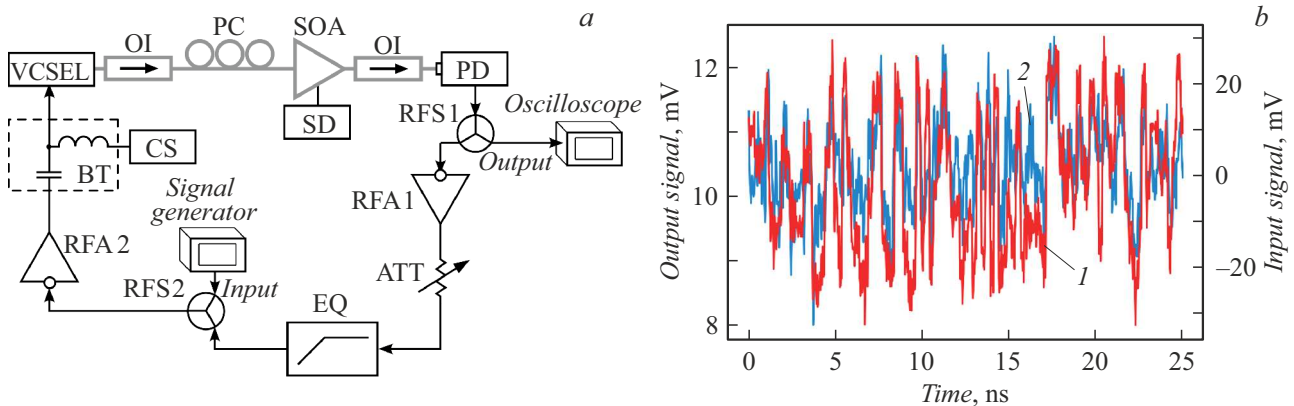


Рис. 1. *a* — схема оптоэлектронной системы резервуарных вычислений на основе ВИЛ и полупроводникового оптического усилителя. Серые линии — оптический сигнал, черные линии — электрический сигнал. *b* — пример временных диаграмм входного сигнала (1) и выходного сигнала (2) при параметрах системы, приведенных в таблице для числа виртуальных узлов 100. Для наглядности входной сигнал инвертирован, поскольку перед поступлением на VCSEL он проходит через инвертирующий RFA 2. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

чения 0.25 mW при 3 mA, полоса модуляции 8 GHz по уровню -3 dB). Накачка лазера осуществляется стабилизированным источником тока Keysight N6705C (CS). Выходное излучение VCSEL проходит через изолятор (OI) и контроллер поляризации (PC) и заводится в полупроводниковый оптический усилитель (SOA, АО „Нолатех“), накачиваемый и терморегулируемый драйвером Nordlase NLDCW-2000-HPR (SD), для увеличения мощности оптического сигнала, регистрируемого фотоприемником Alphalas UPD-15-IR2-FC (PD), который имеет чувствительность 24 mV/mW для длины волны 1550 nm при работе на согласованную нагрузку 50 Ω (соответствует 0.48 A/W). Ток прозрачности SOA (соответствует усилению 0 dB) при работе с VCSEL составил 72 mA. SOA демонстрирует практически линейную зависимость коэффициента усиления от тока с коэффициентом пропорциональности 0.38 dB/mA в диапазоне 72–90 mA. Изоляторы OI используются для предотвращения паразитного влияния оптической обратной связи на лазер и самовозбуждения SOA. Часть выходного электрического сигнала PD через делитель мощности SHWLPD2-DC12S (RFS 1, полоса пропускания 0–12 GHz) направляется в осциллограф Keysight UXR0204A для записи временных диаграмм сигнала PD и регистрации значений состояния узлов системы PB, другая часть подается в электронный тракт петли ОС. Процедура регистрации значений состояния узлов с использованием осциллографа подробно описана в работе [9]. С целью уменьшения влияния шумов записанные осциллографом временные диаграммы подвергались цифровой фильтрации Баттерворта первого порядка: фильтром нижних частот с частотой среза 2 GHz, выбранной для уменьшения влияния шумов системы PB и регистрирующей системы, и фильтром верхних частот с частотой среза 100 kHz, которая выбрана, чтобы уменьшить влияние медленных флуктуаций мощности VCSEL.

Значения экспериментальных параметров

Параметр	Число виртуальных узлов		
	50	100	200
Амплитуда входного сигнала, mV	320	320	280
Ослабление ATT, dB	5.25	5.25	5.00
Частота ввода T_S^{-1} , MHz	64	40	20
T_S , ns	15.6	25	50
τ/T_S	3.72	2.32	1.16

Электронный тракт петли ОС включает в себя два инвертирующих усилителя электрического сигнала Measall KC9601C (RFA 1, 2, полоса усиления 0.05–10 GHz, коэффициент усиления 20 dB). Поскольку оба RFA являются инвертирующими, ОС имеет положительный знак. Между ними установлены аттенуатор DYKB DC-6 GHz (ATT) для управления силой ОС путем внесения потерь электронного сигнала; пассивный эквалайзер (EQ, вносит фиксированные линейно убывающие потери от 10 dB до 0 в диапазоне от 0 до 6 GHz) для увеличения равномерности полосы пропускания; делитель мощности (RFS 2, идентичен RFS 1) для ввода входного сигнала в систему PB посредством генератора сигналов Keysight M8195A со временем ввода одного значения входных данных T_S . На выходе генератора был установлен аттенуатор на 16 dB (не показан на рис. 1, *a*) для его защиты и ограничения амплитуды сигнала, подаваемого через RFA 2 на VCSEL. Процедура формирования входного сигнала системы PB из входных данных, соответствующих решаемой задаче, включая процедуру их маскирования, описана в работе [9].

Сила обратной связи в данной системе определяется в точке размыкания петли ОС, соответствующей выходу ATT, как отношение мощности сигнала, поступающего

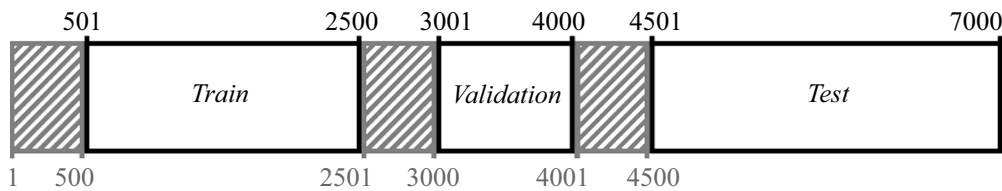


Рис. 2. Схема формирования выборок из массивов входных данных и соответствующих им векторов значений состояния узлов в зависимости от порядкового номера. Серыми заштрихованными участками показаны неиспользуемые значения.

в RFS 2, к мощности сигнала на выходе АТТ. Параметры пропускания ОС измерялись с использованием векторного анализатора R&S ZVA40 как модуль параметра S_{21} . Полоса пропускания всей разомкнутой петли оптоэлектронной системы РВ в определенной выше точке размыкания обуславливается полосой модуляции лазера, которая в свою очередь зависит от частоты его релаксационных колебаний при заданном токе накачки. В настоящей работе использовались значения тока накачки VCSEL 3 мА и SOA 83 мА, при которых полоса пропускания разомкнутой петли по уровню -10 dB от максимума составила 4.98 GHz. Полоса пропускания только электронной части тракта составляет 0.05–8.9 GHz по уровню -10 dB относительно максимума его пропускания при коэффициенте ослабления в диапазоне 0–20 dB.

Потребляемая электрическая мощность системы не превышала 3.5 W (из них 1.17 W — потребление SOA, 2.25 W — потребление всего электронного тракта, 3.8 mW — потребление VCSEL) без учета потребления генератора сигналов и осциллографа. Частота обхода ОС, определенная по радиочастотному спектру, составляет $f_{rep} = 17.2$ MHz (соответствует времени обхода ОС $\tau = 58$ ns и обуславливается временем прохождения сигнала по оптическому и электронному тракту).

При превышении значения силы ОС 0 dB (соответствует коэффициенту ослабления АТТ 4.5 dB) система демонстрирует бифуркацию Андронова–Хопфа с частотой в окрестности 4.25 GHz (соответствует 247-й гармонике частоты обхода f_{rep}), что свидетельствует о высокой размерности пространства состояний системы РВ, обусловленной равномерной и широкой полосой пропускания ОС. Наблюдаемая за границей бифуркации динамика соответствует описанной в работе [16]: с уменьшением коэффициента ослабления последовательно возникают периодический и квазипериодический режимы.

Для экспериментальных исследований были использованы три набора параметров для различного числа виртуальных узлов, соответствующие лучшим результатам решения рассматриваемой задачи предсказания хаотического временного ряда. Значения экспериментальных параметров приведены в таблице.

Задача Santa Fe заключается в предсказании последующего элемента временного ряда на основе известных значений [14] и является более вычислительно слож-

ной по сравнению с задачей предсказания динамики системы Макки–Гласса, рассматриваемой в работе [9], что требует от системы РВ увеличения числа узлов и нелинейности. Погрешность предсказания оценивается как нормализованная среднеквадратичная погрешность (NMSE):

$$NMSE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{(Y_i - O_i)^2}{\sigma^2(Y_i)}, \quad (1)$$

где L — длина проверочной выборки, Y_i — целевое (истинное) значение i -го элемента временного ряда, O_i — предсказанное системой значение i -го элемента, получаемое путем перемножения вектора V_i значений состояния узлов системы РВ, соответствующих i -му входному элементу, на вектор выходного слоя W (см. далее), т. е. $O_i = V_i W$, σ^2 — дисперсия значений.

Для анализа использовалось 7000 значений временного ряда Santa Fe, последовательно вводимых в резервуар. Из входных значений и соответствующих им векторов значений состояния узлов V_i были сформированы обучающая (train), валидационная (validation) и проверочная (test) выборки в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Для предотвращения перекрытий между выборками 500 значений между ними не использовались.

Пример временных диаграмм входного сигнала и выходного сигнала для ввода 2000-го значения входных данных для параметров из таблицы приведен на рис. 1, b (число виртуальных узлов равно 100). Система демонстрирует отклик, отличный от сигнала модуляции, что связано с нелинейностью при наличии обратной связи.

Обучение системы, т. е. подбор весов вектора выходного слоя W , проводилось посредством регуляризации Тихонова, являющейся обобщением линейной регрессии:

$$W = (M^T M + \lambda I)^{-1} M^T Y_{train}, \quad (2)$$

где Y_{train} — вектор целевых значений на обучающей выборке, матрица M составлена из векторов V_i значений состояния узлов резервуара на обучающей выборке, I — единичная матрица соответствующей размерности, λ — параметр регуляризации, имеющий малую величину, который подбирался путем однопараметрической оптимизации, заключающейся в минимизации NMSE на валидационной выборке.

Для уменьшения NMSE за счет увеличения пространства состояний и нелинейности системы РВ в

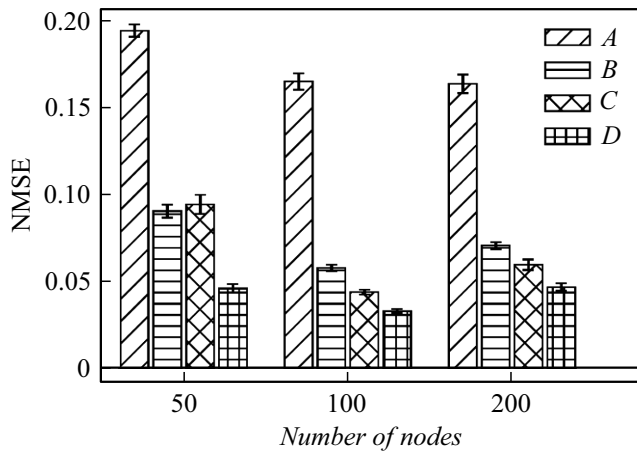


Рис. 3. NMSE при решении задачи Santa Fe для различного числа узлов и различных процедур обработки значений узлов.

работе [17] была предложена процедура обработки, включающая конкатенацию вектора значений состояния узлов $\mathbf{V}_i$ с квадратами значений его элементов, т.е. получение вектора $\mathbf{V}_i^{sq} = [\mathbf{V}_i; \mathbf{V}_i^2]$. В наших экспериментах применялась новая процедура обработки значений состояния узлов, которая заключается в использовании нелинейной сигмоидной функции $\tanh$ для получения значений $\mathbf{V}_i^{th} = \tanh(k\mathbf{V}_i)$, где значение k подбирается на валидационной выборке, перемножение на k и функция $\tanh$ выполняются поэлементно. Значение вектора $\mathbf{V}_i$ предварительно нормируется на диапазон $[-1, 1]$. Нормированные значения данного вектора вычисляются как $2((\mathbf{V}_i - V_{\min})/(V_{\max} - V_{\min}) - 0.5)$, где коэффициенты нормировки $V_{\min} = \min(\mathbf{V}_i)$ и $V_{\max} = \max(\mathbf{V}_i - V_{\min})$ подбираются на векторах $\mathbf{V}_i$, соответствующих обучающей выборке и фиксируются. Также использовалась модификация процедуры, предложенной в работе [17], путем последовательного применения функции $\tanh$ к результатам конкатенации, т.е. вычисления $\mathbf{V}_i^{sq,th} = \tanh(k\mathbf{V}_i^{sq})$.

Таким образом, для решения задачи предсказания временных рядов при составлении матрицы $\mathbf{M}$ для вычисления $\mathbf{W}$ (уравнение (2)) и при определении выходного значения O_i используются значения состояния узлов $\mathbf{V}_i$ (процедура A) либо модифицированные векторы состояний $\mathbf{V}_i^{sq}$ (процедура B), $\mathbf{V}_i^{th}$ (процедура C), $\mathbf{V}_i^{sq,th}$ (процедура D).

Значения NMSE при экспериментальном решении задачи Santa Fe, полученные с использованием разных процедур обработки значений состояния узлов, представлены на рис. 3. На рисунке показаны среднее значение и стандартное отклонение, которые получены на основе пяти повторений измерений. Малое относительное стандартное отклонение (не более 5.8%) свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов экспериментов и консистентности системы РВ.

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что без применения дополнительной обработки (процедура A) наименьшее значение NMSE составляет 0.16 (для 100 узлов). Увеличение числа узлов совместно с увеличением времени ввода одного элемента данных не приводит к улучшению результатов, что хорошо согласуется с результатами, представленными в [18], где было показано, что для систем РВ с большими временами запаздывания, в которых τ значительно превышает время отклика системы, для уменьшения погрешности решения задач целесообразно использовать несколько вводов символов на один обход резонатора, т.е. $\tau/T_s \geq 2$.

Использование дополнительной обработки (процедуры B, C, D) показывает существенное уменьшение NMSE для всех случаев. При этом способ с нелинейной функцией $\tanh$ (процедура C) обладает преимуществом перед конкатенацией с квадратами значений вектора состояний (процедура B) для 100 и 200 узлов. Гибридный способ, совмещающий нелинейную функцию и конкатенацию с квадратами значений (процедура D), показывает наименьшую погрешность, которая достигает 0.046, 0.033 и 0.047 для 50, 100 и 200 узлов соответственно, что сопоставимо с результатами, представленными в [13,19] (0.022 и 0.045). При этом максимально достижимая скорость обработки рассматриваемой системы (64 Msamples/s при частоте ввода 64 MHz) превосходит значения 1 и 24.5 Msamples/s для систем РВ, представленных в работах [13,19].

Таким образом, путем модификации выходного слоя возможно улучшение качества решений системы РВ без усложнения процесса обучения, т.е. подбора весовых коэффициентов $\mathbf{W}$, которые все так же определяются посредством регуляризации Тихонова.

В заключение отметим, что в настоящей работе экспериментально продемонстрировано функционирование оптоэлектронной системы РВ на основе ВИЛ и полупроводникового оптического усилителя при решении задачи предсказания хаотического временного ряда Santa Fe, проанализированы различные способы обработки значений состояния виртуальных узлов. Показано, что применение выходного слоя, использующего обработку, состоящую из последовательных операций конкатенации вектора значений состояния узлов системы РВ с вектором их квадратов и вычисления нелинейной функции $\tanh$, способно существенно снизить погрешность решения задачи Santa Fe до 0.033 при частоте ввода данных 40 MHz (соответствует скорости обработки 40 Msamples/s). Учитывая последние достижения в области аналоговых оптоэлектронных вычислений [20], возможно формирование выходного слоя и реализация процедуры обработки значений состояния виртуальных узлов в аналоговом виде с увеличением энергоэффективности и скорости вычислений, что делает перспективным данное направление исследований.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01050 (<https://rscf.ru/project/23-72-01050/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Appeltant, M.C. Soriano, G. Van der Sande, J. Danckaert, S. Massar, J. Dambre, B. Schrauwen, C.R. Mirasso, I. Fischer, *Nat. Commun.*, **2**, 468 (2011). DOI: 10.1038/ncomms1476
- [2] J.D. Hart, L. Larger, T.E. Murphy, R. Roy, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **377** (2153), 20180123 (2019). DOI: 10.1098/rsta.2018.0123
- [3] M. Yan, C. Huang, P. Bienstman, P. Tino, W. Lin, J. Sun, *Nat. Commun.*, **15** (1), 2056 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-45187-1
- [4] S. Abreu, I. Boikov, M. Goldmann, T. Jonuzi, A. Lupo, S. Masaad, L. Nguyen, E. Picco, G. Pourcel, A. Skalli, L. Talandier, B. Vettelschoss, E.A. Vlieg, A. Argyris, P. Bienstman, D. Brunner, J. Dambre, L. Daudet, J.D. Domenech, I. Fischer, F. Horst, S. Massar, C.R. Mirasso, B.J. Offrein, A. Rossi, M.C. Soriano, S. Sygletos, S.K. Turitsyn, *Rev. Phys.*, **12**, 100093 (2024). DOI: 10.1016/j.revip.2024.100093
- [5] X. Liang, J. Tang, Y. Zhong, B. Gao, H. Qian, H. Wu, *Nat. Electron.*, **7** (3), 193 (2024). DOI: 10.1038/s41928-024-01133-z
- [6] X. Shi, L.L. Minku, X. Yao, *IEEE Trans. Comput.*, **71** (110), 2766 (2022). DOI: 10.1109/TC.2022.3173151
- [7] W. Namiki, D. Nishioka, Y. Yamaguchi, T. Tsuchiya, T. Higuchi, K. Terabe, *Adv. Intell. Syst.*, **5** (12), 2300228 (2023). DOI: 10.1002/aisy.202300228
- [8] G. Abdi, T. Mazur, K. Szaciłowski, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63** (5), 50803 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad394f
- [9] Г.О. Даниленко, Д.А. Павлов, Е.А. Викторov, А.В. Ковалев, *Письма в ЖТФ*, **50** (17), 26 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58577.19971 [G.O. Danilenko, D.A. Pavlov, E.A. Viktorov, A.V. Kovalev, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (9), 24 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.09.59147.19971].
- [10] P.S. Dmitriev, A.V. Kovalev, A. Locquet, D. Rontani, E.A. Viktorov, *Opt. Lett.*, **45** (22), 6150 (2020). DOI: 10.1364/OL.405177
- [11] G.O. Danilenko, A.V. Kovalev, E.A. Viktorov, A. Locquet, D.S. Citrin, D. Rontani, *Chaos*, **33** (1), 013116 (2023). DOI: 10.1063/5.0127661
- [12] G.O. Danilenko, A.V. Kovalev, E.A. Viktorov, A. Locquet, D.S. Citrin, D. Rontani, *Chaos*, **33** (11), 113125 (2023). DOI: 10.1063/5.0172039
- [13] B.H. Klimko, Y.K. Chembo, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **36** (23), 1353 (2024). DOI: 10.1109/LPT.2024.3477352
- [14] A.S. Weigend, N.A. Gershenfeld, *Time series prediction: forecasting the future and understanding the past* (Routledge, N.Y., 1993).
- [15] A. Ohkubo, M. Inubushi, *Sci. Rep.*, **14**, 30918 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-81880-3
- [16] M.S. Islam, A.V. Kovalev, G. Coget, E.A. Viktorov, D.S. Citrin, A. Locquet, *Phys. Rev. Appl.*, **13** (6), 064038 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.064038
- [17] J. Pathak, B. Hunt, M. Girvan, Z. Lu, E. Ott, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 024102 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.024102
- [18] K. Saito, K. Kanno, A. Uchida, *Nonlin. Theory Appl.*, **15**, 764 (2024). DOI: 10.1587/nolta.15.764
- [19] I. Estèbenez, A. Argyris, I. Fischer, *Opt. Lett.*, **48** (9), 2449 (2023). DOI: 10.1364/OL.485545
- [20] Z. Lin, B.J. Shastri, S. Yu, J. Song, Y. Zhu, A. Safarnejadian, W. Cai, Y. Lin, W. Ke, M. Hammood, T. Wang, M. Xu, Z. Zheng, M. Al-Qadasi, O. Esmaceli, M. Rahim, G. Pakulski, J. Schmid, P. Barrios, W. Jiang, H. Morison, M. Mitchell, X. Guan, N.A.F. Jaeger, L.A. Rusch, S. Shekhar, W. Shi, S. Yu, X. Cai, L. Chrostowski, *Nat. Commun.*, **15**, 9081 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-53261-x