

Источники одиночных фотонов внутри пузырьков на гомо-интерфейсе слоев гексагонального нитрида бора

А. В. Грициенко^{+*1)}, М. В. Пугачев⁺, М. О. Аврамчиков^{+×}, А. Г. Витухновский^{+*}, А. Ю. Кунцевич^{+°}

⁺Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

^{*}Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Россия

[×]Российский университет дружбы народов, 117198 Москва, Россия

[°]Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 апреля 2024 г.

После переработки 27 апреля 2024 г.

Принята к публикации 29 апреля 2024 г.

Существует небольшое количество материалов, которые при комнатной температуре могут содержать источники одиночных фотонов – необходимые элементы квантовых коммуникаций. Одним из таких материалов является гексагональный нитрид бора. В данной работе исследуются механически собранные гомоструктуры из двух пластин нитрида бора. На интерфейсе между этими пластинами образуются микропузырьки из адсорбированных остатков молекул воды и углеродных соединений. После высокотемпературного отжига образцов в областях микропузырьков формируются стабильные однофотонные источники, излучающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах при комнатной температуре. Обнаруженное явление открывает путь к созданию стабильных излучателей контролируемым образом с помощью сборки гомоструктур.

DOI: 10.31857/S1234567824110053, EDN: MULXXX

Введение. Источники в твердых телах, испускающие одиночные фотоны, могут являться элементами квантовой связи [1–3] и использоваться в микроскопии сверхвысокого разрешения [4]. Исследование таких одиночных источников в кристаллах также представляет интерес для лазерных приложений [5, 6] и сенсоров [1]. Основной характеристикой источника одиночных фотонов является их высокая “чистота”, которая определяется по величине корреляционной функции второго порядка при нулевой задержке. В дополнение к этому свойству, для различных приложений требуется, чтобы однофотонный источник обладал достаточной интенсивностью излучения, стабильной во времени работой [7, 8], а в некоторых случаях способен испускать фотоны, которые в высокой степени неразличимы друг от друга [2, 9]. Другим ключевым требованием является контролируемое формирование однофотонных излучателей на подложке для дальнейшего соединения их с оптическими элементами [10, 11].

Среди материалов, в которых могут содержаться стабильно работающие при комнатной температуре источники одиночных фотонов, выделяют алмаз

[12–14] и в последнее время гексагональный нитрид бора [15, 16]. Возникновение излучателей в гексагональном нитриде бора (hBN) и их использование как источников одиночных фотонов в последнее время активно обсуждается в литературе [17–19]. Установлено, что излучатели имеют различный спектральный состав, яркость и фотостабильность [20, 21].

Для квантовых приложений необходима планарная масштабируемая технология создания однофотонных источников света. Потенциал нитрида бора связан с хорошо отработанной технологией формирования больших слоев hBN методами химического осаждения из газовой фазы [22, 23] и сборкой этих слоев на различных подложках [24–26]. Также hBN интересен тем, что является единственным ван-дер Ваальсовым материалом, в котором однофотонные источники существуют при комнатной температуре [15]. Для формирования излучателей в hBN использовались различные способы обработки: лазерная абляция [27], воздействие электронным или ионным пучком [28–30], высокотемпературный отжиг [31], обработка в озоне [32], локальное воздействие зондом атомно-силового микроскопа [33], а также комбинации этих воздействий. При таком разнообразии методов формирования и раз-

¹⁾e-mail: grits_alex@rambler.ru

бросе свойств излучателей выделить ключевой фактор воздействия, необходимого для их формирования, – непростая задача.

На сегодняшний момент в литературе нет понимания атомной структуры большинства наблюдаемых излучателей в гексагональном нитриде бора. Ряд исследователей предполагают, что в формировании излучающих центров участвует углерод, атомы которого могут внедряться в кристаллическую структуру нитрида бора в процессе синтеза из углеродных примесей или прекурсоров [34, 35], либо напрямую в результате ионной имплантации [36].

В данной работе, для того чтобы установить роль углерода в формировании излучающих центров в гексагональном нитриде бора, мы воспользовались двумя простыми обстоятельствами: (i) в нормальных условиях на любой поверхности сорбируется слой воды и органических веществ [37, 38]; (ii) при приведении двух ван-дер Ваальсовых чешуек в контакт, происходит прилипание с эффектом самоочистки поверхности, при этом вода и другие вещества собираются в микропузырьки [39, 40].

Мы исследовали гомоструктуры из двух слоев нитрида бора, в которых самопроизвольно образуются микропузыри. Термическая обработка в кислородосодержащей среде полученных гомоструктур привела к образованию однофотонных излучателей непосредственно в областях, в которых сформировались пузырьки. Данные излучатели обладали высокой интенсивностью люминесценции, для которой не наблюдалась деградация в процессе оптических измерений. Спектральный отклик варьировался от излучателя к излучателю, и отдельные излучатели имели максимумы люминесценции в районе 550–750 нм. Наши результаты показывают, что формирование подобных излучателей связано с присутствием углеродных соединений и наличием локальных напряжений в нитриде бора.

Изготовление образцов. Чешуйки гексагонального нитрида бора были получены на полированных кремниевых пластинах методом стандартного механического отщепления при помощи скотча. Клейкая лента с кристаллом hBN прижималась к предварительно нагретой до температуры 85 °C подложке в течение 2 минут, после чего плавно отсоединялась со скоростью около 1 мм/с. В результате чешуйки hBN отрывались от клейкой ленты и оставались на подложке. Для удаления остатков клея, подложка обрабатывалась в кислородной плазме в течение 30 с при мощности – 50 мВт и давлении – $2 \cdot 10^{-1}$ мбар, а также промывалась ацетоном, изопропанолом и деионизированной

водой. Для позиционирования на образце использовалась система координатных меток, которая была заранее изготовлена на кремниевой пластине с помощью оптической литографии [41] и термического напыления титана.

Поиск подходящих чешуек hBN на подложке проводился визуально, с помощью оптического микроскопа. Отбирались чешуйки с латеральным размером несколько десятков микрометров однородного цвета без деформаций и трещин. Толщина чешуек предварительно оценивалась по цвету самой чешуйки: рассеянный цвет чешуйки зависит от ее толщины и может быть определен с точностью в несколько десятков нанометров [42]. Для более точной характеристики толщин hBN использовался атомно-силовой микроскоп (Solver Pro M, NT-MDT) в полуконтактной моде.

Сборка гомоструктур hBN была выполнена на самодельной установке с помощью метода сухого переноса [43]. Для этого использовался полимерный штамп из полидиметилсилоксана (PDMS) и полипропиленкарбоната (PPC). Чешуйка hBN переносилась на полимерный штамп при температуре 40 °C и опускалась со штампа на другую чешуйку hBN при 80 °C.

При сборке структур образуются пузырьки (см. рис. 1), которые формируются как в местах, где нижняя чешуйка имеет деформации, остаточные загрязнения и “вздутия”, так и в случайных местах. Образование пузырьков в случайных местах часто возникает при сборке гомо- и гетероструктур и наблюдалось неоднократно в литературе [44, 45]. Считается, что основным фактором, вызывающим формирование таких пузырьков, является скопление воздуха и воды между слоями, которые не смогли высвободиться через границы при сборке. После сборки подложка с гомоструктурами отжигалась в воздушной атмосфере при нормальном давлении и температуре 800 °C на протяжении одного часа.

Оптические измерения. Образцы с гомоструктурами hBN были исследованы на сканирующем конфокальном микроскопе, схема которого представлена на рис. 2. Люминесценция излучателей в hBN возбуждалась с помощью непрерывного твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS) и длиной волны 532 нм. Излучение от лазера фокусировалось с помощью микрообъектива (100X, NA = 0.95). Сигнал люминесценции от образца с помощью дихроичного зеркала проходил через точечную диафрагму (75 мкм) и затем регистрировался лавинным фотодиодом. Все измерения проводились при температуре около 24 °C.

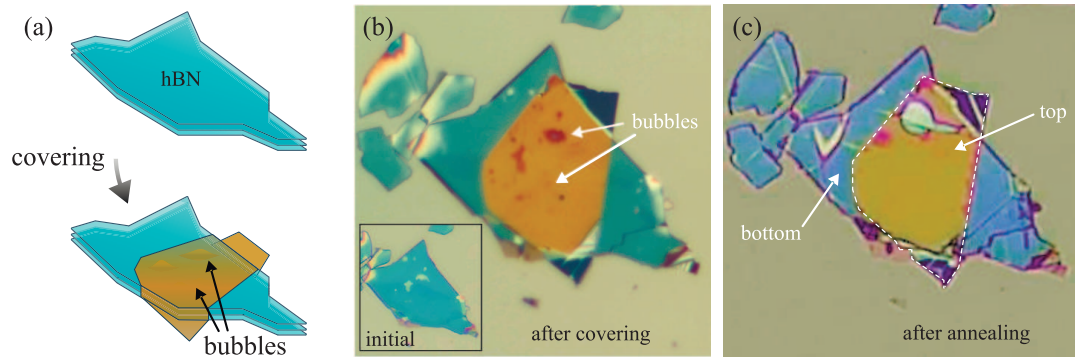


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Принципиальная схема сборки гомоструктур. Оптические фотографии: гомоструктура hBN/hBN до (b) и после (c) высокотемпературного отжига. Вставка на рисунке (b): нижняя чешуйка hBN до сборки

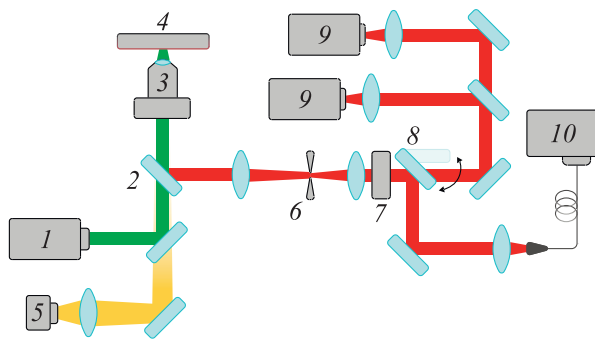


Рис. 2. (Цветной онлайн) Сканирующий конфокальный микроскоп с интерферометром Хэнбери Брауна и Твисса: 1 – лазер накачки (532 нм); 2 – дихроическое зеркало; 3 – микрообъектив (100X, NA = 0.95) на пьезостолке; 4 – столик с образцом; 5 – светодиод; 6 – точечная диафрагма; 7 – оптический интерференционный фильтр; 8 – поворотное зеркало; 9 – лавинные фотодиоды; 10 – волоконный спектрометр

Результаты и обсуждение. Сканирование областей с пузырями в гомоструктурах hBN выявило наличие ярко люминесцирующих пятен вдали от границ чешуек (рис. 3). Примечательно, что фотолюминесценция видна именно из областей, которые соответствуют микропузырям, как следует из изображения, полученного с помощью оптического профилометра (CHOTEST SuperView W1). Отметим, что до отжига данные области чешуек hBN не содержали аналогичных стабильных во времени излучающих пятен. Как ранее было сказано, образование пузырей при укладке чешуек hBN связано с наличием остатков воздуха, молекул воды и органики, которые оказываются зажатými между двух отдельных чешуек. Наличие деформаций и напряжений в кристаллической структуре пластин hBN при последующем отжиге приводит к перераспределению молекул вдоль образца и накоплению их в отдельные полости. Характерные латеральные размеры образующихся по-

лостей составляли до 10 мкм, а толщина, как видно из рис. 3с, – около 2–6 нм, более крупные до 100 нм.

С помощью измерений на спектрометре (Optosky ATR 6500) были получены спектры ФЛ отдельных пятен на образце. На рисунке 4а представлены спектры для областей, обозначенных на рис. 3b и d как P1 и P2. Данные области в дальнейшем будем обозначать как излучатели P1 и P2. Для излучателя P1 присутствует набор линий в диапазоне от 550 до 800 нм. При этом в спектре у P2 присутствуют линии на длинах волн 597 и 644 нм, которые совпадают с отдельными линиями излучателя P1. Ширина линии на полувысоте для P2 достигает 4 нм на длине волны 597 нм, а для P1 – до 10 нм на длине волны 644 нм. Также во всей области наложения двух чешуек hBN видна слабая люминесценция с широким спектром излучения (рис. 4а, серая кривая).

Для того чтобы выяснить, какова интенсивность люминесценции отдельного излучателя, была измерена кривая насыщения для P1 (рис. 4b). Экспериментально полученная зависимость интенсивности излучения на длине волны 644 нм от мощности накачки $I(P)$ была аппроксимирована выражением

$$I(P) = I_{\infty} \frac{P}{P_{\text{sat}} + P} + bP, \quad (1)$$

где I_{∞} – интенсивность насыщения излучения при $P \rightarrow \infty$, P_{sat} – мощность насыщения, b – коэффициент, отвечающий за вклад фонового излучения. Зависимость интенсивности люминесценции от мощности лазерной накачки была измерена с использованием дополнительного полосового фильтра с шириной пропускания 20 нм и центром на 650 нм. Скорректированные значения интенсивности излучения без вклада фонового излучения для P1 отдельно представлены синей кривой, а вклад фонового излучения – серой кривой (рис. 4b). Как следует из рис. 4b,

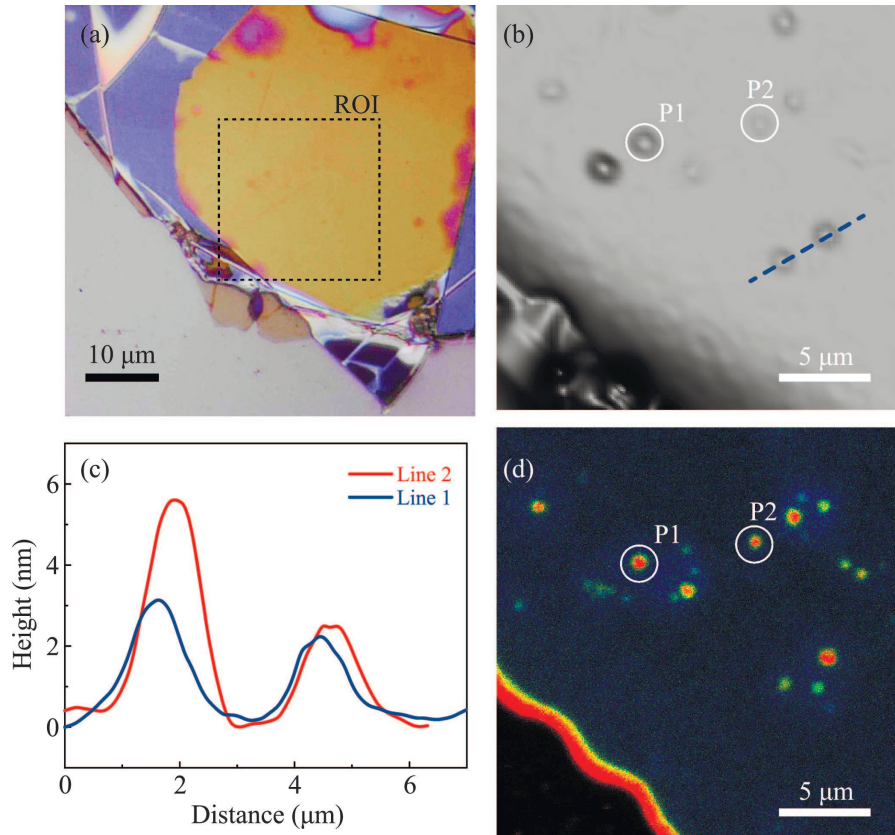


Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Оптическая фотография гомоструктуры hBN. Квадратом обозначена область исследования (*region of interest*, ROI). (b) – Карта сканирования оптическим профилометром области, обозначенной ROI на рисунке (a). (c) – Высотные профили сканирования пузырей. Кривой Line 2 соответствует область, обозначенная на рисунке (b) пунктирной линией. (d) – Люминесцентная карта сканирования на конфокальном микроскопе области, обозначенной ROI на рисунке (a). Кружками на рисунках (b) и (d) обозначены области, которые проявляют однофотонную статистику

вклад фонового излучения значителен, особенно при мощности накачки больше 0.5 мВт. Из полученных данных для P1 интенсивность насыщения составляет $I = 10^5$ отсчетов в секунду. Данная величина сопоставима с интенсивностями люминесценции различных излучателей на основе центров в алмазах и ранее исследованных излучателей в нитриде бора [46, 47].

Для определения фотонной статистики излучателей использовалась интерференционная схема Хэнбери Брауна и Твисса (ХБТ) с двумя детекторами, как описано в работе [48]. С помощью интерферометра ХБТ измерялась автокорреляционная функция второго порядка $g^{(2)}(\tau)$. На рисунках 4с и d представлены корреляционные функции с учетом вклада фонового излучения ($g_{\text{corr}}^{(2)}(\tau)$) согласно выражению [49, 50]:

$$g_{\text{corr}}^{(2)}(\tau) = \frac{g_{\text{exp}}^{(2)}(\tau) - (1 - \rho^2)}{\rho^2}, \quad (2)$$

где $g_{\text{exp}}^{(2)}(\tau)$ – экспериментально измеренная автокорреляционная функция второго порядка, при этом

значение $\rho = S/(S + B)$, где S и B – интенсивности люминесценции излучателя и фона. Значения S и B были получены из измерения кривой насыщения. Таким образом, при мощности накачки 0.3 мВт (плотность мощности ~ 0.2 МВт/см²) значение ρ составило 0.755. Полученные скорректированные функции $g^{(2)}(\tau)$ были аппроксимированы в модели с использованием трех уровней энергии [51]:

$$g^{(2)}(\tau) = 1 - C_0 e^{-\frac{|\tau|}{\tau_0}} + C_1 e^{-\frac{|\tau|}{\tau_1}}, \quad (3)$$

где τ_0 и τ_1 – времена релаксации функции $g^{(2)}(\tau)$, ассоциированные с временем жизни возбужденного и метастабильного уровней, C_0 и C_1 – амплитуды. Из рисунков 4с и d видно, что излучатели демонстрируют провал функции $g^{(2)}(\tau = 0)$ меньше 0.5 при нулевой временной задержке. Таким образом, можно говорить, что данные излучатели P1 и P2 проявляют свойства однофотонного излучателя.

При этом в спектре ФЛ видно, что для отдельных излучателей может присутствовать несколько спек-

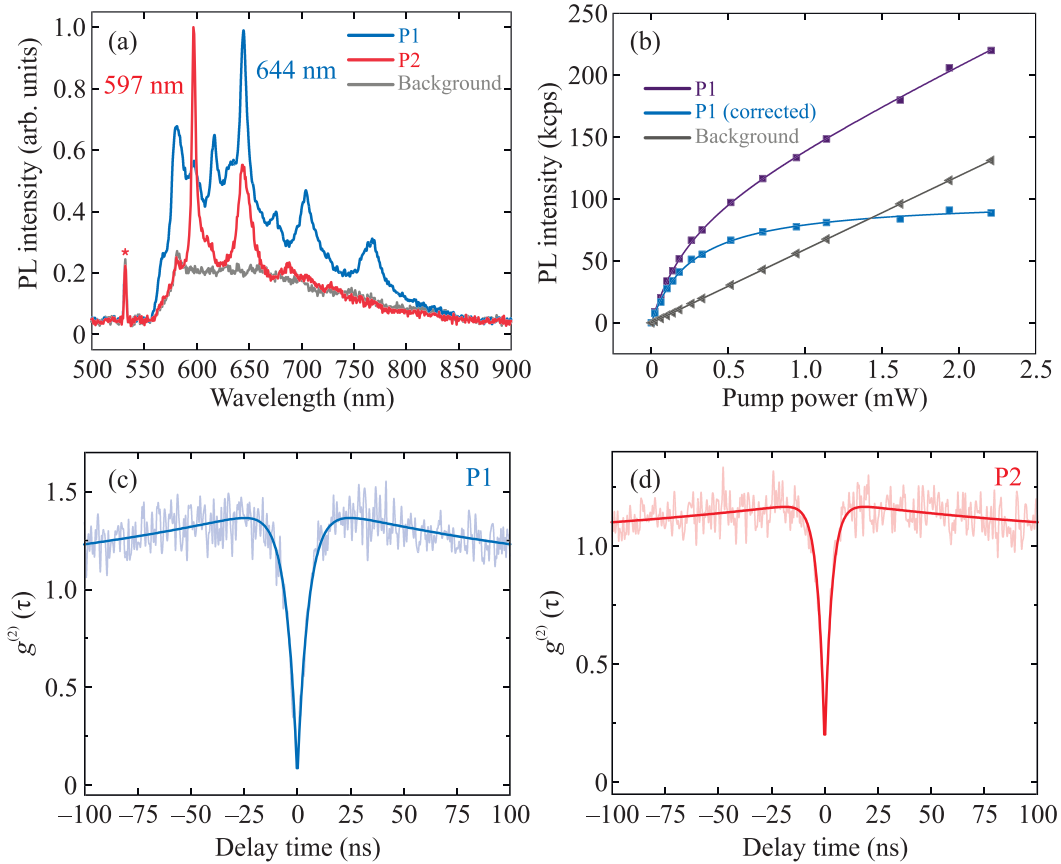


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Спектры ФЛ излучателей из областей P1 и P2, обозначенных на рис. 2d. Звездочкой отмечена линия остаточного излучения лазерной накачки 532 нм. (б) – Зависимость интенсивности ФЛ излучателя P1 (фиолетовые квадраты, без коррекции) от мощности лазерной накачки. Кривая насыщения с учетом фонового излучения представлена синими квадратами и вклад фонового излучения – серыми треугольниками. Сплошными прямыми приведены аппроксимирующие зависимости согласно модели, описанной в тексте. Интенсивность излучения выражена в килоотсчетах в секунду (кcps). Значения параметров аппроксимации для синей зависимости составляют $I_{\infty} = (100 \pm 1) \cdot 10^3$ отсчетов в секунду и $P_{\text{sat}} = 270 \pm 10$ мкВт. (с), (d) – Автокорреляционные функции второго порядка для излучателей P1 (644 нм) и P2 (597 нм) с учетом фонового излучения. Значения провала $g^{(2)}(0)$ функции вблизи нулевой временной задержки и времени релаксации τ_0 в результате аппроксимации экспериментальных данных составляют $g^{(2)}(0) = 0.04 \pm 0.04$ и $\tau_0 = 5.3 \pm 0.2$ нс для (с); $g^{(2)}(0) = 0.14 \pm 0.04$ и $\tau_0 = 3.3 \pm 0.2$ нс для (d). Для излучателя P1 использовался полосовой фильтр 650 нм, а для P2 – 590 нм

тральных линий в диапазоне от 570 до 800 нм. Наличие нескольких линий может говорить о разных явлениях. С одной стороны, серия спектральных линий может быть связана со скоплением ярких и фотостабильных излучателей в одной малой области, ограниченной диаметром 0.5 мкм. С другой стороны, люминесценция может быть связана с излучением органических молекул на поверхности hBN [52, 53]. Возможен механизм люминесценции аналогичный излучению донор-акцепторных пар, обнаруженный ранее [54–56].

Времена релаксации возбужденных состояний выявленных излучателей, в том числе и на разных длинах волн, лежат в диапазоне 2–5 нс. При этом из-

за присутствия фонового излучения в кривых затухания встречается компонента с более коротким временем, лежащим в диапазоне 0.3–0.5 нс.

Дополнительно было проведено сравнение спектров излучения вблизи крупных пузырей и вдали от пузырей на чешуйке hBN (рис. 5). Для области чешуйки hBN без пузырей, видна характерная линия комбинационного рассеяния кристаллической структуры hBN ($\sim 1365 \text{ см}^{-1}$). Данная линия соответствует высокочастотной моде E_{2g} и связана со смещениями атомов бора и азота в противоположных направлениях в каждой плоскости hBN [57, 58]. В то же время, спектр комбинационного рассеяния для случая вблизи границы пузыря демонстрирует наличие

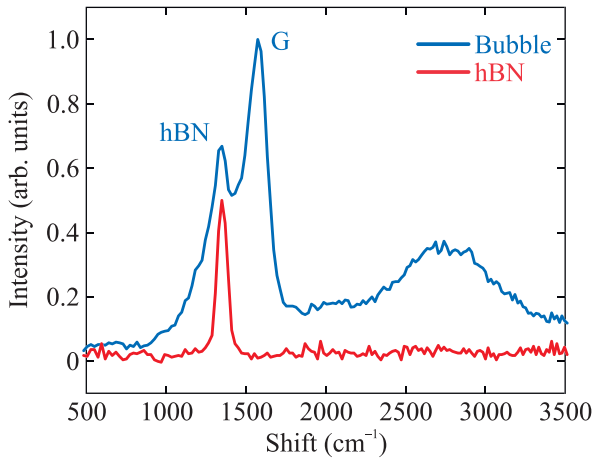


Рис. 5. (Цветной онлайн) Спектры комбинационного рассеяния из различных областей чешуйки hBN. Синяя кривая получена из области вблизи границы микропузыря

дополнительного максимума ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$), который близок к комбинационному рассеянию графита (G – пик), а также аморфного углерода и графена [59, 60]. Это рассеяние отвечает за колебания sp^2 -связанных атомов углерода в одной плоскости [61]. Мы полагаем, что данная особенность связана с наличием остатков углеродных соединений в промежутках между пластинами hBN при сборке гомоструктур. Данные углеродные соединения могут приводить к появлению наблюдаемого в эксперименте фонового излучения с временем высвечивания менее 0.5 нс в кривых затухания и с широкой спектральной полосой люминесценции [62, 63].

В процессе высокотемпературного отжига углеродные соединения могут разлагаться на различные простейшие элементы, в том числе и углерод. Отдельные атомы углерода при высокой температуре могут встраиваться в кристаллическую решетку hBN, образуя излучающие дефекты [64, 65]. Вероятность этого внедрения, по-видимому, связана как с объемом углеродного вещества, находящегося в контакте с поверхностью hBN, так и с наличием локальных деформаций, например, в местах образования пузырей.

В связи с полученными данными, является перспективным контролируемое создание излучателей в hBN при использовании структурированных подложек для потенциального формирования пузырей между слоями hBN в заданных местах [66, 67].

Закключение. Обнаружены фотостабильные излучатели в гомоструктурах на основе двух сложенных пластин hBN, которые создавались с помощью разработанной технологии сухой сборки. Выявлен-

ные излучатели локализуются внутри микропузырей и вызваны наличием остатков углеродных соединений, а их люминесценция активируется в результате высокотемпературного отжига. Данные излучатели испускают одиночные фотоны, что подтверждается наличием провала автокорреляционной функции второго порядка меньше 0.5 при нулевой временной задержке. Отдельные излучатели имеют ширину линий на полувысоте до 4 нм, а в насыщении могут достигать интенсивности излучения порядка 10^5 фотонов в секунду. Для квантовых технологий необходимо детерминированное расположение источников одиночных фотонов, функционирующих при комнатной температуре, что может быть достигнуто за счет обнаруженного в данной работе формирования излучающих пузырей при использовании структурированных подложек.

Авторы благодарят Н. С. Курочкина (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН) за полезные обсуждения. Изготовление образцов осуществлялось на оборудовании Центра коллективного пользования Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

Финансирование. Работа была поддержана грантом Российского научного фонда (проект # 22-19-00324).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. A. Arzhanov, A. Savostianov, K. Magaryan, K. Karimullin, and A. Naumov, *Photonics Russia* **16**, 96 (2022)
2. М. Рахлин, К. Беляев, Г. Клишко, И. Седова, М. Кулагина, Ю. Задиранов, С. Трошков, Ю. Гусева, Я. Терентьев, С. Иванов, *Письма в ЖЭТФ* **109**, 147 (2019).
3. Е. Попов, В. Решетов, *Письма в ЖЭТФ* **111**, 846 (2020).
4. И. Ерёмчев, М. Еремчев, А. Наумов, *Успехи физических наук* **189**, 312 (2019).
5. В. Дресвянский, С. Бойченко, С. Зилов, А. Ракевич, А. Войтович, Е. Мартынович, *Известия Российской академии наук. Серия физическая* **80**, 97 (2016).
6. В. Дресвянский, А. Ищенко, Е. Мартынович, С. Мурзин, А. Черных, В. Паперный, *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, **86**, 1374 (2022).
7. C. Morrison, R. Pousa, F. Graffitti, Z. Koong, P. Barrow, N. Stoltz, D. Bouwmeester, J. Jeffers, D. Oi, and B. Gerardot, *Nat. Commun.* **14**, 3573 (2023).
8. A. Al-Juboori, H. Zeng, M. Nguyen, X. Ai, A. Laucht, A. Solntsev, M. Toth, R. Malaney, and I. Aharonovich, *Advanced Quantum Technologies* **6**, 2300038 (2023).

9. А. Галимов, М. Рахлин, Г. Климов, Ю. Задиранов, Ю. Гусева, С. Трошков, Т. Шубина, А. Торопов, *Письма в ЖЭТФ* **113**, 248 (2021).
10. А. Витухновский, Р. Звагельский, Д. Колымагин, А. Писаренко, Д. Чубич, *Известия Российской академии наук. Серия физическая* **84**, 927 (2020).
11. A. Vitukhnovsky, D. Kolymagin, A. Gritsienko, I. Dushkin, A. Pisarenko, A. Prokhodtsov, M. Danilkin, and G. Prutskov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **87**, 87 (2023).
12. Е. Екимов, М. Кондрин, *Успехи физических наук* **187**, 577 (2017).
13. A. Romshin, O. Kudryavtsev, E. Ekimov, A. Shkarin, D. Rattenbacher, M. Rakhlin, A. Toropov, and I. Vlasov, *JETP Lett.* **112**, 13 (2020).
14. A. Romshin, A. Gritsienko, A. Ilin, R. Bagramov, S. Filonenko, A. Vitukhnovsky, and I. Vlasov, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics* **16**, 193 (2023).
15. S. Vasconcellos, D. Wigger, U. Wurstbauer, A. Holleitner, R. Bratschitsch, and T. Kuhn, *Phys. Status Solidi (b)* **259**, 2100566 (2022).
16. Ю. Петров, О. Гогина, О. Вывенко, *Журнал технической физики* **92**, 52778 (2022).
17. J. Caldwell, I. Aharonovich, G. Cassabois, J. Edgar, B. Gil, and D. Basov, *Nat. Rev. Mater.* **4**, 552 (2019).
18. A. Sajid, M. Ford, and J. Reimers, *Rep. Prog. Phys.* **83**, 044501 (2020).
19. A. Shaik and P. Palla, *Sci. Rep.* **11**, 12285 (2021).
20. S. Castelletto, F. Inam, S. Sato, and A. Boretti, *Beilstein J. Nanotechnol.* **11**, 740 (2020).
21. I. Aharonovich, J. Tétienne, and M. Toth, *Nano Lett.* **22**, 9227 (2022).
22. Y. Shi, C. Hamsen, X. Jia, K. Kim, A. Reina, M. Hofmann, A. Hsu, K. Zhang, H. Li, and Z. Juang, *Nano Lett.* **10**, 4134 (2010).
23. S. Liu, R. He, L. Xue, J. Li, B. Liu, and J. Edgar, *Chem. Mater.* **30**, 6222 (2018).
24. M. Yankowitz, Q. Ma, P. Jarillo-Herrero, and B. LeRoy, *Nat. Rev. Phys.* **1**, 112 (2019).
25. T. Iwasaki, K. Endo, E. Watanabe, D. Tsuya, Y. Morita, S. Nakaharai, Y. Noguchi, Y. Wakayama, K. Watanabe, and T. Taniguchi, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**, 8533 (2020).
26. I. Juma, G. Kim, D. Jariwala, and S. Behura, *IScience* **24**, 103374 (2021).
27. L. Gan, D. Zhang, R. Zhang, Q. Zhang, H. Sun, Y. Li, and C. Ning, *ACS Nano* **16**, 14254 (2022).
28. J. Ziegler, R. Klaiß, A. Blaikie, D. Miller, V. Horowitz, and B. Alemán, *Nano Lett.* **19**, 2121 (2019).
29. C. Fournier, A. Plaud, S. Roux, A. Pierret, M. Rosticher, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Buil, X. Quélin, and J. Barjon, *Nat. Commun.* **12**, 3779 (2021).
30. G. Liu, X. Wu, P. Jing, Z. Cheng, D. Zhan, Y. Bao, J. Yan, H. Xu, L. Zhang, and B. Li, *Adv. Opt. Mater.* **12**, 2302083 (2023).
31. Y. Chen, C. Li, S. White, M. Nonahal, Z. Xu, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Toth, T. Tran, and I. Aharonovich, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13**, 47283 (2021).
32. C. Li, Z. Xu, N. Mendelson, M. Kianinia, M. Toth, and I. Aharonovich, *Nanophotonics* **8**, 2049 (2019).
33. X. Xu, Z. Martin, D. Sychev, A. Lagutchev, Y. Chen, T. Taniguchi, K. Watanabe, V. Shalaev, and A. Boltasseva, *Nano Lett.* **21**, 8182 (2021).
34. X. Du, J. Li, J. Lin, and H. Jiang, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 021110 (2015).
35. H. Liu, N. Mendelson, I. Abidi, S. Li, Z. Liu, Y. Cai, K. Zhang, J. You, M. Tamtaji, and H. Wong, *ArXiv Preprint ArXiv:2110.04780* (2021).
36. N. Mendelson, D. Chugh, J. Reimers, T. Cheng, A. Gottscholl, H. Long, C. Mellor, A. Zettl, V. Dyakonov, and P. Beton, *Nat. Mater.* **20**, 321 (2021).
37. J. Albar, V. Korolkov, M. Baldoni, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Besley, and P. Beton, *J. Phys. Chem. C* **122**, 27575 (2018).
38. N. Ronceray, Y. You, E. Glushkov, M. Lihter, B. Rehl, T. Chen, G. Nam, F. Borza, K. Watanabe, and T. Taniguchi, *Nat. Mater.* **22**, 1236 (2023).
39. E. Khestanova, F. Guinea, L. Fumagalli, A. Geim, and I. Grigorieva, *Nat. Commun.* **7**, 12587 (2016).
40. S. Wakolbinger, F. Geisenhof, F. Winterer, S. Palmer, J. Crimmann, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Trixler, and R. Weitz, *2D Mater.* **7**, 035002 (2020).
41. M. Pugachev, A. Duleba, A. Galiullin, and A. Kuntsevich, *Micromachines* **12**, 850 (2021).
42. D. Golla, K. Chattrakun, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. LeRoy, and A. Sandhu, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 161906 (2013).
43. S. Martanov, N. Zhurbina, M. Pugachev, A. Duleba, M. Akmaev, V. Belykh, and A. Kuntsevich, *Nanomaterials* **10**, 2305 (2020).
44. E. Blundo, A. Surrente, D. Spirito, G. Pettinari, T. Yildirim, C. Chavarin, L. Baldassarre, M. Felici, and A. Polimeni, *Nano Lett.* **22**, 1525 (2022).
45. H. Lee, S. Sarkar, K. Reidy, A. Kumar, J. Klein, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. LeBeau, F. Ross, and S. Gradecak, *Nat. Commun.* **13**, 5000 (2022).
46. S. Lukishova and L. Bissell, *Quantum Photonics: Pioneering Advances and Emerging Applications* **217**, 103 (2019).
47. M. Dastidar, I. Thekkooden, P. Nayak, and V. Bhallamudi, *Nanoscale* **14**, 5289 (2022).
48. A. Gritsienko, A. Duleba, M. Pugachev, N. Kurochkin, I. Vlasov, A. Vitukhnovsky, and A. Kuntsevich, *Nanomaterials* **12**, 4495 (2022).
49. R. Brouri, A. Beveratos, J. Poizat, and P. Grangier, *Opt. Lett.* **25**, 1294 (2000).

50. R. Fishman, R. Patel, D. Hopper, T. Huang, and L. Bassett, *PRX Quantum* **4**, 010202 (2023).
51. A. Gritsienko, A. Matveev, N. Kurochkin, G. Voskanyan, D. Shcherbakov, D. Shtansky, and A. Vitukhnovsky, *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 10462 (2022).
52. R. Smit, A. Tebyani, J. Hameury, S. Molen, and M. Orrit, *Nat. Commun.* **14**, 7960 (2023).
53. M. Neumann, X. Wei, L. Morales-Inostroza, S. Song, S. Lee, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Götzinger, and Y. Lee, *ACS Nano* **17**, 11679 (2023).
54. Q. Tan, J. Lai, X. Liu, D. Guo, Y. Xue, X. Dou, B. Sun, H. Deng, P. Tan, and I. Aharonovich, *Nano Lett.* **22**, 1331 (2022).
55. G. Melani, J. Guerrero-Felipe, A. Valencia, J. Krumland, C. Cocchi, and M. Iannuzzi, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24**, 16671 (2022).
56. D. Pasternak, A. Romshin, R. Bagramov, A. Galimov, A. Toropov, D. Kalashnikov, V. Leong, A. Satanin, O. Kudryavtsev, and A. Chernev, *ArXiv Preprint ArXiv:2310.18822* (2023).
57. R. Geick, C. Perry, and G. Rupprecht, *Phys. Rev.* **146**, 543 (1966).
58. T. Kuzuba, K. Era, T. Ishii, and T. Sato, *Solid State Commun.* **25**, 863 (1978).
59. D. Tallant, T. Friedmann, N. Missert, M. Siegal, and J. Sullivan, *MRS Online Proceedings Library* **498**, 37 (1997).
60. S. Reich and C. Thomsen, *Philosophical Transactions of The Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences* **362**, 2271 (2004).
61. А. Зиятдинов, *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук* **214**, 27 (2020).
62. M. Berberan-Santos, A. Fedorov, J. Conde, C. Godet, T. Heitz, and J. Bouree, *Chem. Phys. Lett.* **319**, 113 (2000).
63. S. Sarkar, D. Gandla, Y. Venkatesh, P. Bangal, S. Ghosh, Y. Yang, and S. Misra, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 21278 (2016).
64. M. Onodera, M. Isayama, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Masubuchi, R. Moriya, T. Haga, Y. Fujimoto, S. Saito, and T. Machida, *Carbon* **167** 785 (2020).
65. Y. Gong, G. Shi, Z. Zhang, W. Zhou, J. Jung, W. Gao, L. Ma, Y. Yang, S. Yang, and G. You, *Nat. Commun.* **5**, 3193 (2014).
66. E. Yanev, T. Darlington, S. Ladyzhets, M. Strasbourg, C. Trovatiello, S. Liu, D. Rhodes, K. Hall, A. Sinha, and N. Borys, *Nat. Commun.* **15**, 1543 (2024).
67. H. Cheng and Y. Lu, *Microfluidics and Nanofluidics* **17**, 855 (2014).