16,09

# Влияние стехиометрических дефектов на спектр комбинационного рассеяния света и поляризационную анизотропию в двумерном магнитном полупроводнике CrSBr

© Д.Л. Гусенков[1,2], Э.О. Чиглинцев[3,4], А.И. Чернов[3,4], В.В. Савин[1], Р.Б. Моргунов[1,2,4,5,¶]

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия
[2] ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия
[3] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
[4] Российский квантовый центр, Инновационный Центр „Сколково“, Москва, Россия
[5] Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия
[¶] E-mail: spintronics2022@yandex.ru

*Поступила в Редакцию 26 октября 2025 г.*
*В окончательной редакции 19 января 2026 г.*
*Принята к публикации 27 января 2026 г.*

Представлены результаты исследований оптических свойств образцов CrSBr с различной стехиометрией. В одном из образцов был дефицит брома и наличие примесной фазы $Cr_2S_3$. Поляризационная спектроскопия комбинационного рассеяния света выявила, что такие дефекты приводят к снижению интенсивности основных колебательных мод, их уширению и смещению частот. Полученные результаты демонстрируют, что спектроскопия комбинационного рассеяния света является эффективным, неразрушающим методом для быстрой оценки стехиометрии и качества кристаллов CrSBr, что имеет первостепенное значение для воспроизводимости их магнитных и оптических свойств.

**Ключевые слова:** двумерные полупроводники, стехиометрия, спектроскопия КРС, рентгенофлюоресцентный анализ.

DOI: 10.61011/FTT.2026.02.62728.300-25

## 1. Введение

Двумерные (2D) материалы, характеризующиеся атомарной толщиной и слабой ван-дер-ваальсовой связью между слоями, открыли новые горизонты в физике конденсированного состояния и наноэлектронике [1–3]. Среди них особый интерес представляют анизотропные магнитные полупроводники, сочетающие полупроводниковое поведение с магнитным упорядочением, что делает их перспективными для спинтроники и квантовых технологий [4,5]. Ключевым требованием для практического применения таких материалов является стабильность их свойств, которая напрямую зависит от качества кристаллической решетки, стехиометрии и степени текстурирования поликристаллов [6–8]. Одним из наиболее эффективных неразрушающих методов зондирования этих параметров является поляризационно-разрешенная спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Этот метод позволяет не только идентифицировать фазовый состав и число слоев, но и определять кристаллографическую ориентацию, локальные напряжения, степень упорядоченности и анизотропное электрон-фононное взаимодействие в низкосимметричных кристаллах [7,8]. В орторомбических 2D-материалах (например, черный фосфор, $ReS_2$, CrSBr) угловая зависимость интенсивности мод активных в спектрах КРС используется для определения кристаллической симметрии [7,8]. Недавние работы показали, что положение пиков по частоте также может нести информацию о резонансных электронных переходах и локальной анизотропии [9].

Особое место среди магнитных ван-дер-ваальсовых полупроводников занимает CrSBr — слоистое соединение с орторомбической структурой ($Pmmn$, точечная группа $D_{2h}$), проявляющее A-тип антиферромагнетизм ($T_N \approx 132$ K) и квазиодномерный характер электронной структуры [5,10]. CrSBr демонстрирует сильную оптическую и электро-транспортную анизотропию, а также спин-фононное взаимодействие, чувствительное к дефектам структуры [10–12]. Спектры КРС CrSBr характеризуются тремя основными модами симметрии $A_g$: $A_g^1$ ($\sim 114\,\mathrm{cm}^{-1}$), $A_g^2$ ($\sim 244\,\mathrm{cm}^{-1}$) и $A_g^3$ ($\sim 344\,\mathrm{cm}^{-1}$), отражающими колебания атомов Br, Cr и S [10,12] в плоскости слоев и перпендикулярно слоям.

Критически важной особенностью CrSBr является его чувствительность к стехиометрическим нарушениям: даже небольшой дефицит брома приводит к появлению характерной дефектной моды D1 ($\sim 110\,\mathrm{cm}^{-1}$), уши-

рению линий и изменению магнитных свойств [10,12]. Более того, недавние исследования показали, что мода $A_g^2$ проявляет резонансное переключение поляризации в зависимости от энергии возбуждения: при 2.33 eV она поляризована вдоль магнитно-промежуточной оси $a$, а при меньших энергиях — вдоль легкой магнитной оси $b$ [13]. Это явление объясняется анизотропией тензора КРС и резонансным электрон-фононным взаимодействием, связанным с квази-одномерной электронной структурой [10,13]. Подобные эффекты делают спектроскопию КРС не просто структурным, но и электронно-чувствительным методом.

Большинство исследований спектров КРС выполнено на эксфолиированных флейках толщиной от монослоя до нескольких атомных слоев с контролируемой кристаллографической ориентацией. В то же время объемные поликристаллические образцы, используемые при выращивании кристаллов, характеризуются случайной ориентацией зерен, локальными напряжениями и неоднородным распределением дефектов. В таких системах сигнал представляет собой усредненный вклад множества дезориентированных кристаллитов, что приводит к неоднородному уширению линий, ослаблению анизотропии и, возможно, к подавлению зависимости положения линий от ориентации плоскости поляризации света по отношению к кристаллическим плоскостям [7,8].

Целью работы является анализ влияния стехиометрии и поликристаллической текстуры флейков и объемных поликристаллов CrSBr на анизотропию поляризационно-разрешенных спектров КРС.

## 2. Методика и образцы

В экспериментах были использованы два типа кристаллов CrSBr. Образец 1 был приобретен в фирме „2D Semiconductors“, а образец 2 был выращен компанией „HQ graphene“. Магнитные и механические свойства этих образцов были описаны нами в предыдущих исследованиях [14,15]. Толщина образцов была $\sim 0.01-0.5$ mm и значительно превышала толщину мономолекулярного слоя, что позволило не учитывать особенности, связанные с наномасштабными образцами.

Химический состав образцов был определен с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на сканирующем электронном микроскопе Zeiss LEO SUPRA 25. Эта методика основана на возбуждении внутриатомных переходов рентгеновским излучением с последующим излучением фотонов, частота которых идентифицирует атомы в образце. Ее применение было обусловлено необходимостью контроля стехиометрии.

Спектроскопия КРС позволяет определять колебательные частоты кристаллической решетки и спектры КРС зависят не только от химического состава, но и от кристаллической структуры материала. Более длинные волны, чем рентгеновское излучение, используемые в спектроскопии КРС, не возбуждают внутренних электронных переходов в атомах и поэтому не могут быть использованы для идентификации химических элементов. Однако методика КРС позволяет различать фазы, присутствующие в образце по характерным частотам атомных колебаний.

Спектры КРС были записаны при комнатной температуре на конфокальном спектрометре Confotec NR500. В качестве источника возбуждения использовали твердотельный лазер с длиной волны излучения 532 nm (энергия фотонов 2.33 eV) и выходной мощностью 16 mW на образце. Фокусировка лазерного излучения и сбор сигнала КРС осуществлялись с помощью объектива 40×. В спектрометре была установлена дифракционная решетка с плотностью 1800 lines/mm, обеспечивающая спектральное разрешение $\sim 0.9\,\mathrm{cm}^{-1}$. Боковое пространственное разрешение системы, определяемое размером дифракционно-ограниченного фокального пятна, составило $\sim 500$ nm.

Для измерения угловой зависимости спектра образец вращался в плоскости $ab$ относительно неподвижного лазерного луча с шагом 10° в диапазоне от 0° до 350°. Поляризация возбуждающего и рассеянного света была параллельной оси $a$ в начале отсчета. Калибровка прибора происходила по образцу кремния, имеющего пик в спектре КРС при $520.5\,\mathrm{cm}^{-1}$.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

### 3.1. Химический состав и атомная структура

На рис. 1, *a* показаны спектры EDX для образцов 1 и 2 соответственно. Оба образца имеют схожие спектры, однако, соотношение интенсивностей пиков в этих спектрах говорит о разнице в стехиометрии этих образцов. Результаты количественного анализа концентраций химических элементов в обоих образцах представлены на рис. 1, *b*.

Исходя из структурной формулы образцы должны иметь равные концентрации всех атомов. Однако образец 1 имеет значительное отклонение в стехиометрии из-за недостатка брома. Химический состав образца 2 соответствует составу, заявленному изготовителем.

### 3.2. Спектр КРС и идентификация мод

По результатам расчетов в рамках теории функционала плотности (DFT), спектр КРС стехиометрического CrSBr при поляризации света вдоль оси $b$ демонстрирует три основные моды: $A_g^1$ ($\sim 114\,\mathrm{cm}^{-1}$), $A_g^2$ ($\sim 244\,\mathrm{cm}^{-1}$) и $A_g^3$ ($\sim 344\,\mathrm{cm}^{-1}$) [10]. Мода $A_g^1$ связана с внеплоскостными колебаниями атомов брома, $A_g^2$ — с колебаниями Cr, S и Br, а мода $A_g^3$ — преимущественно с колебаниями Cr и S в плоскости. Колебания атомов в кристаллической решетке, а также удельный вклад атомов в формирование мод, передаваемый длиной стрелок, представлены на рис. 2. На рис. 3 представлены полученные спектры КРС обоих образцов.

Данные спектроскопии КРС в образцах 1 и 2 и литературные данные для линий $A_g^1$, $A_g^2$, $A_g^3$

| | | Образец 1 | Образец 2 | CrSBr из [10] |
|---|---|---|---|---|
| $A_g^1$ | Положение пика, $cm^{-1}$ | 115.3 | 114.5 | 114 |
| | Ширина пика, $cm^{-1}$ | 5.47 | 6.75 | – |
| $A_g^2$ | Положение пика, $cm^{-1}$ | 246.9 | 244.3 | 244 |
| | Ширина пика, $cm^{-1}$ | 5.27 | 3.65 | – |
| $A_g^3$ | Положение пика, $cm^{-1}$ | 347.9 | 343.9 | 344 |
| | Ширина пика, $cm^{-1}$ | 7.24 | 9.08 | – |

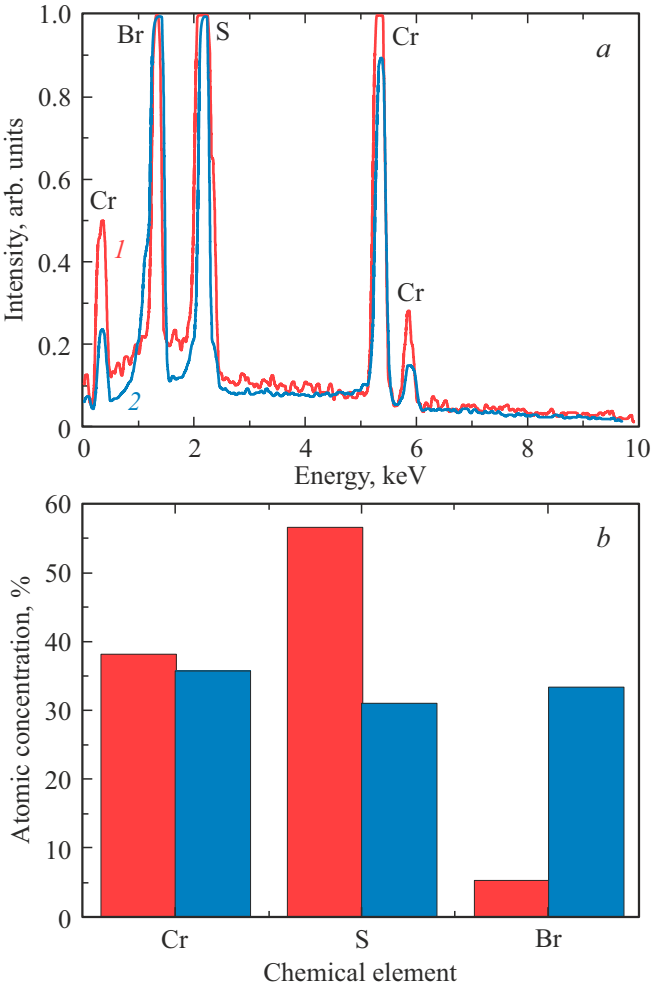


**Рис. 1.** *a* — спектры EDX образца 1 (красная линия, *1*) и образца 2 (синяя линия, *2*). *b* — химический состав образца 1 (красный цвет) и образца 2 (синий цвет).

При механическом отщеплении флейка от образца 1 получаются два типа микро-образцов: ограненные пластинки (рис. 4, *a*) и бесформенные хлопья (рис. 4, *b*). Их спектры КРС значительно различаются. Спектр комбинационного рассеяния света кристалла в виде бесформенных хлопьев представлен на рис. 3, *a*. Подробное исследование данного типа кристаллов представлено в нашей предыдущей статье [14]. Стоит заметить, что для бесформенных хлопьев не удалось получить зависимости от направления поляризации света. Вероятно, это связано с большой долей замещения фазы CrSBr на фазу $Cr_2S_3$ и с разориентацией зерен образующейся новой фазы, которая делает спектры изотропными.

В спектре образца 1, сохранившего прямоугольную кристаллографическую огранку, наблюдается значительное перераспределение интенсивности всех трех мод и смещение положений пиков (рис. 3, *b*) по сравнению с совершенным по химическому составу образцом 2 (рис. 3, *c*). Кроме этого, выявленных пиков наблюдается уменьшение их ширины на половине высоты (FWHM), за исключением пика $A_g^2$.

В таблице собраны количественные показатели линий спектра КРС для обоих типов образцов и литературные данные. Наиболее убедительным доказательством обеднения бромом является появление дополнительного пика D1 (см. рис. 3, *d*) при $\sim 110\,cm^{-1}$ и расположенного на $\sim 5-10\,cm^{-1}$ ниже основной моды $A_g^1$. Этот пик полностью соответствует моде D1, связанной с дефектами, идентифицированной ранее, как вакансии брома на поверхности, возникающие, в частности, при гидролизе [10]. Наличие пика D1 в образце 1 является прямым доказательством дефицита брома, обнаруженного также методом EDX. При этом спектр химически совершенного образца 2 такой моды не содержит (см. рис. 3, *c*).

### 3.3. Зависимость спектра КРС от угла поляризации света

На рис. 5 представлены спектры КРС при разных углах между плоскостью поляризации света и плоскостью *ab*. Измерения производились с шагом 10°.

Угловые зависимости интенсивности мод $A_g^1$, $A_g^2$ и $A_g^3$, представленные на рис. 6, *a–c*, демонстрируют синусоидальную зависимость с периодом 180° для обоих исследуемых образцов. Это поведение полностью согласуется с орторомбической кристаллической симметрией CrSBr (пространственная группа *Pmmn*, точечная группа $D_{2h}$) и теоретическими предсказаниями для мод симметрии

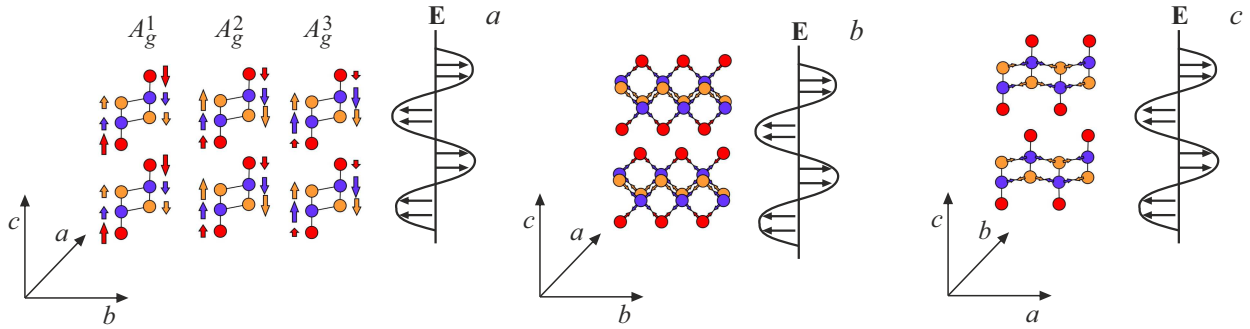


**Рис. 2.** Схема колебаний атомов в модах $A_g^1$, $A_g^2$. (*a*) Стрелками показан удельный вклад колебания атома на моду. (*b*) Колебания кристаллической решетки вдоль кристаллографической оси *a* при колебаниях вектора электрического поля *E* в плоскости *bc*. (*c*) Колебания кристаллической решетки вдоль кристаллографической оси *b* при колебаниях вектора электрического поля *E* в плоскости *ac*. Синие символы — атомы хрома, оранжевые символы — атомы серы, красные символы — атомы бром.

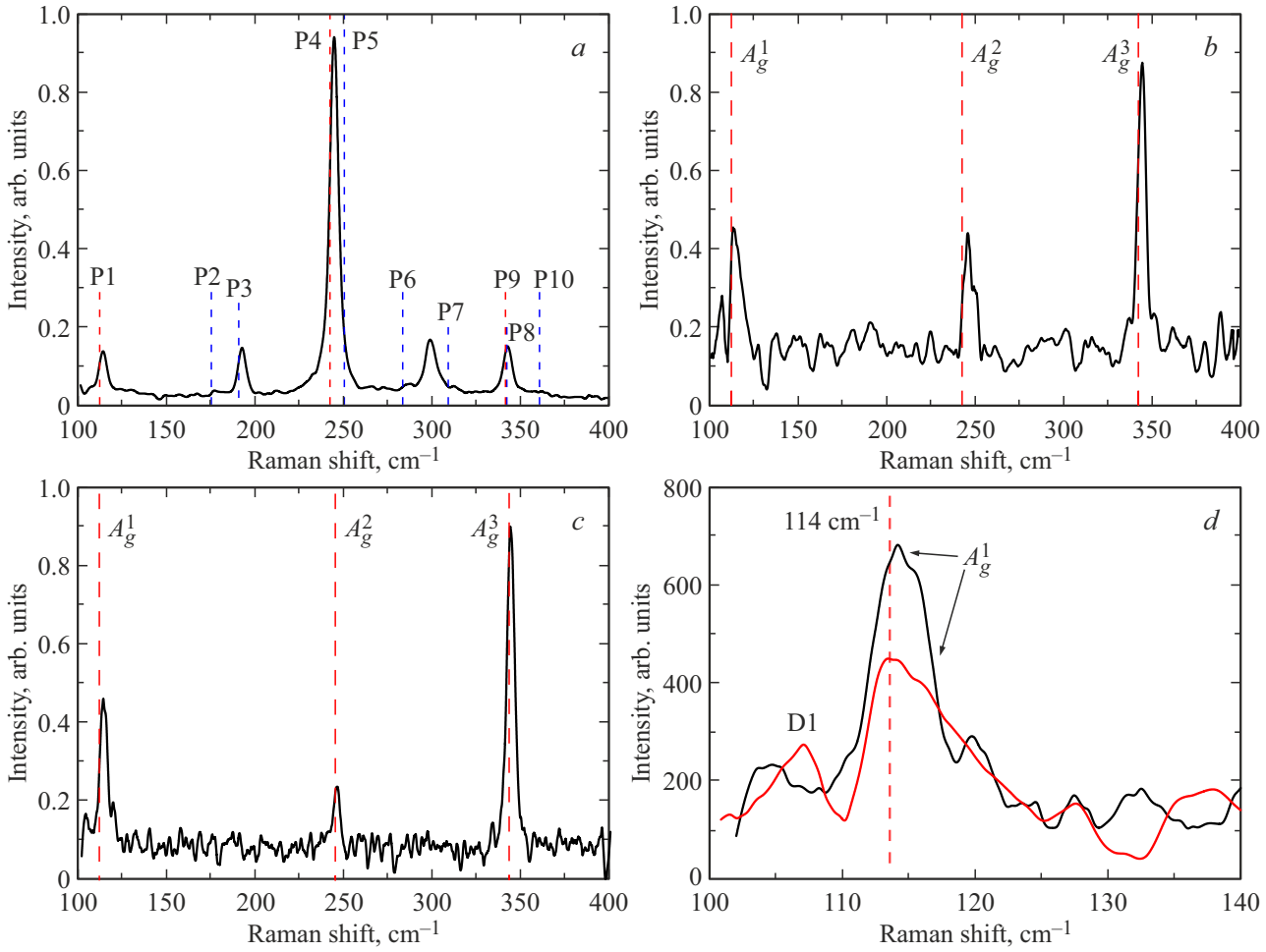


**Рис. 3.** *a* — спектр КРС образца 1 в бесформенных хлопьях при ориентации плоскости поляризации света в плоскости *bc*. Красные пунктирные линии — это положения пиков для CrSBr в литературе [16], синие пунктирные линии — положение пиков $Cr_2S_3$, взятые из литературы [12]. *b* — спектр КРС ограненного фрагмента образца 1 при ориентации плоскости поляризации света в плоскости *bc*. *c* — спектр КРС образца 2 при ориентации плоскости поляризации света в плоскости *bc*. *d* — сравнение спектров КРС образцов 1 и 2 вблизи моды $A_g^1$. Черная линия — спектр КРС образца 2. Красная линия — спектр КРС образца 1.

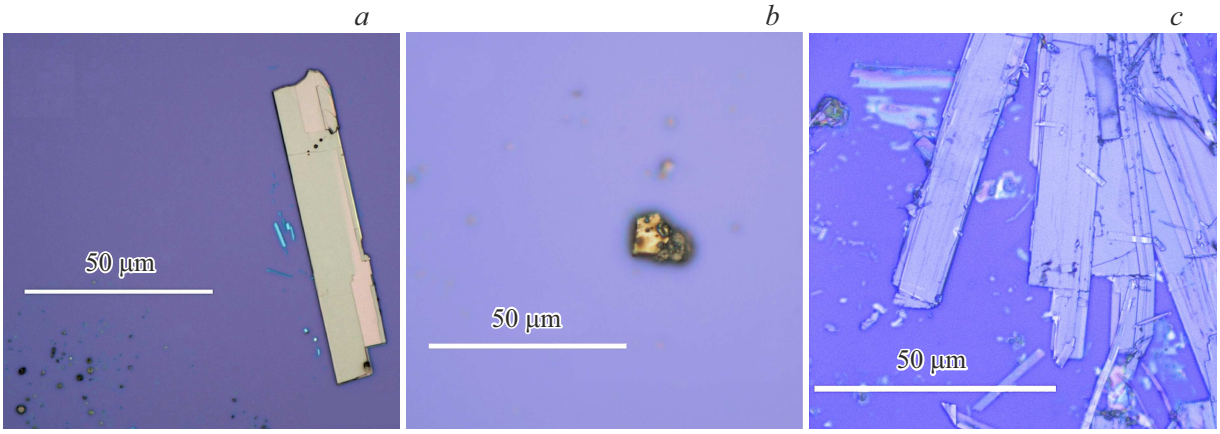


**Рис. 4.** Микрофотографии ограненных кристаллов (*a*) и бесформенных хлопьев (*b*) образца 1, и ограненных кристаллов образца 2 (*c*).

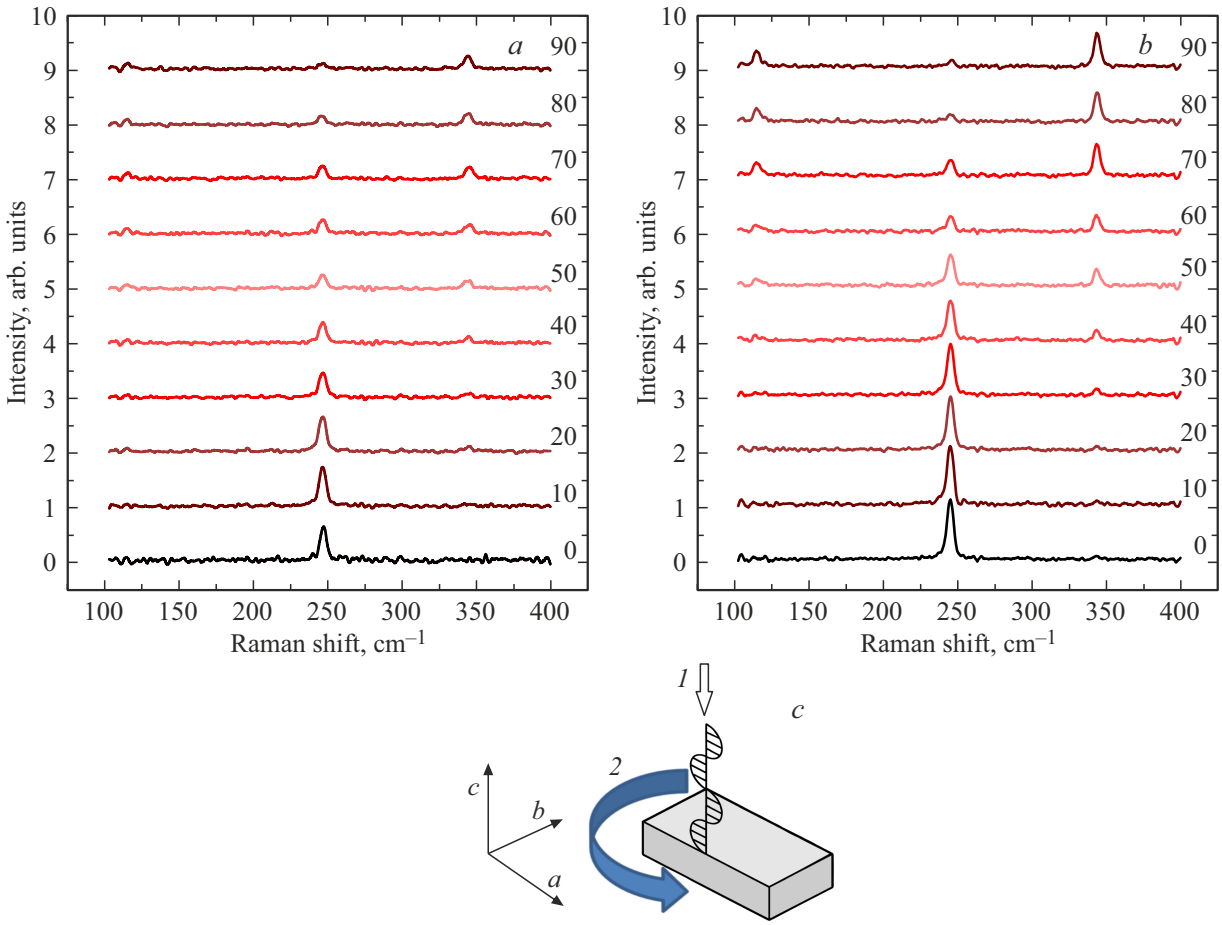


**Рис. 5.** Спектры КРС образца 1 (*a*) и образца 2 (*b*) при разных углах между плоскостью поляризации света и плоскостью *ac* (*c*), угол 0° соответствует ситуации, когда плоскость поляризации света лежит в плоскости *ca* (*1*), а угол 90° — в плоскости *bc*. Вращение образца осуществляли вокруг оси *c* (*2*).

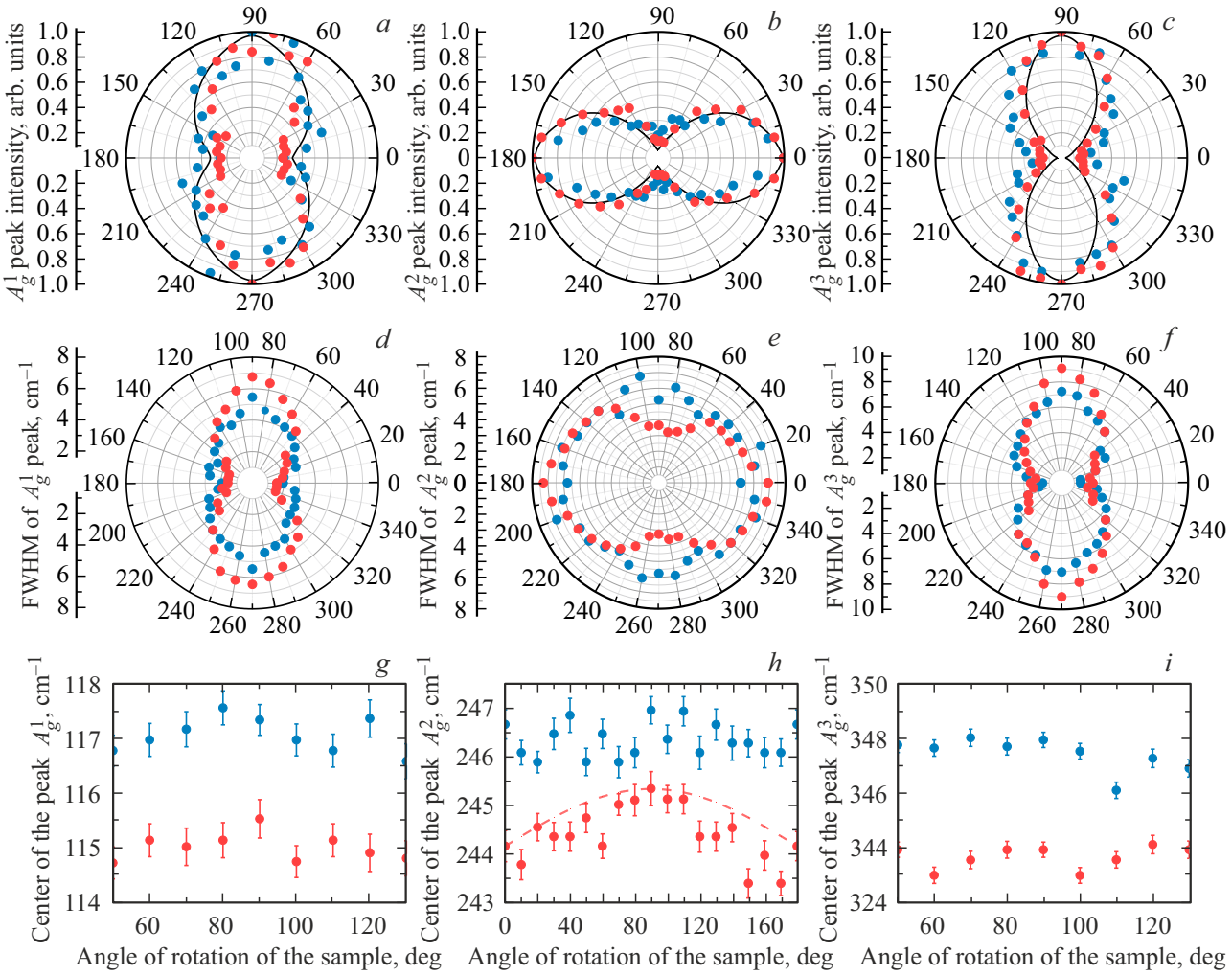


**Рис. 6.** Зависимости нормированных интенсивностей пиков $A_g^1$ (*a*), $A_g^2$ (*b*) и $A_g^3$ (*c*) от угла между плоскостью поляризации и кристаллографической плоскостью *ac*: синие точки — данные для образца 1, красные точки — данные для образца 2, черная линия — данные для образца CrSBr, толщиной 62 nm [13]. Зависимости FWHM пиков $A_g^1$ (*d*), $A_g^2$ (*e*) и $A_g^3$ (*f*) от угла поворота образца $\alpha$. Зависимости положений центров пиков $A_g^1$ (*g*), $A_g^2$ (*h*) и $A_g^3$ (*i*) от угла поворота образца: синие точки — данные для образца 1, красные точки — данные для образца 2, красная пунктирная линия — аппроксимация положения пиков образца 2 синусоидальной функцией.

$A_g^i$ [7,8]. Для мод симметрии $A_g^i$ в орторомбическом кристалле CrSBr (группа $D_{2h}$) тензор КРС, определяющий интенсивность линий спектра, диагонален [13]:

$$R(A_g) = \begin{pmatrix} R_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & R_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & R_{zz} \end{pmatrix},$$

где $x \equiv a$, $y \equiv b$, $z \equiv c$ — кристаллографические оси. При поляризации света в плоскости *ac*, зависимость интенсивности полученных пиков в резонансных условиях описывается формулой:

$$I(\alpha) = (R_{xx}\cos^2\alpha + R_{yy}\sin^2\alpha).$$

В результате максимумы интенсивности мод $A_g^1$ и $A_g^3$ наблюдаются при углах 0 и 180° (поляризация вдоль оси *a*), тогда как мода $A_g^2$ достигает максимума при 90° и 270° (поляризация вдоль оси *b*). Нормированные экспериментальные кривые для стехиометрического образца 2 согласуются с данными, полученными в литературе [13] для образца CrSBr, толщиной 62 nm при энергии возбуждения 2.33 eV, что подтверждает корректность наших измерений и высокое качество кристалла.

Важно отметить, что кристаллы $Cr_2S_3$ имеют ромбоэдрическую кристаллическую решетку с пространственной группой $R\bar{3}$, что соответствует 120°-периодичности мод [17]. Поэтому возможные отклонения от идеальной 180°-симметрии, наблюдаемые на угловых зависимостях в образце 1, могут быть связаны с присутствием этой фазы. Фаза $Cr_2S_3$, имеющая другую симметрию, может вносить вклад в сигнал, который не подчиняется 180°-периодичности, что приводит к возмущениям в форме полярных диаграмм.

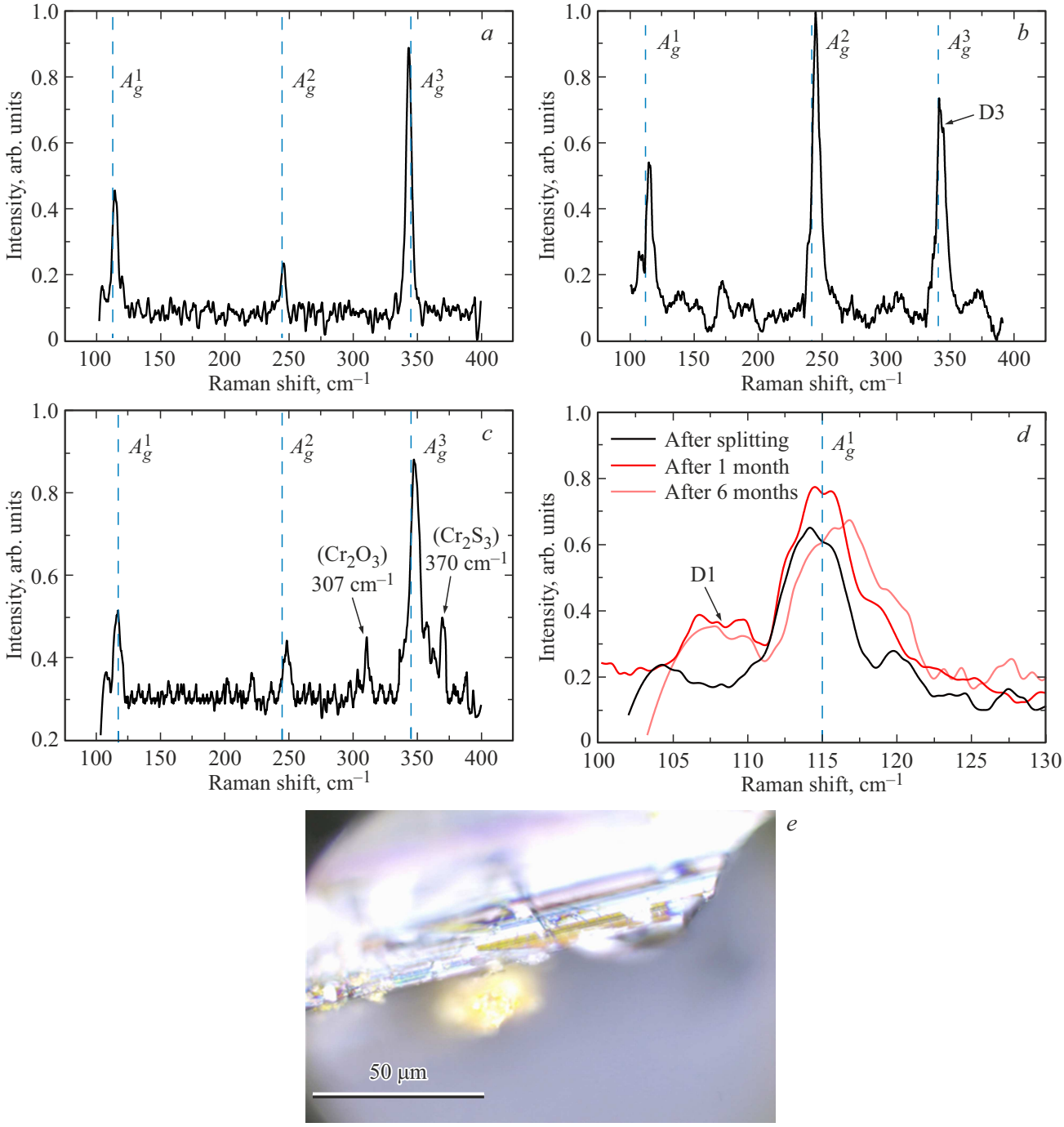


**Рис. 7.** Спектр КРС образца 2 сразу после механического расщепления ($a$), через месяц после расщепления ($b$) и через 6 месяцев после расщепления ($c$). $d$ — спектры $A_g^1$ и D1, записанные через разное время, прошедшее после эксфолиации. Синие пунктирные линии показывают положения пиков CrSBr. $e$ — микрофотография исследуемого образца через 6 месяцев после эксперимента.

Анализ FWHM пиков на рис. 6, $d$–$f$ выявляет различия образцов 1 и 2: в образце 1 наблюдается значительное уширение мод $A_g^1$ и $A_g^3$ при углах при 0 и 180°. Также наблюдаются различия в симметрии интенсивности и полуширины линии $A_g^2$ в образце 1. Интенсивность линии максимальна при угле $\alpha = 0$ между плоскостью поляризации и кристаллографической плоскостью $ac$, а ширина этой линии и положение ее центра практически изотропны с точностью до ошибки измерений. Это означает, что в образце 1 содержится фаза, в которой атомные колебания более изотропны.

Ключевое различие между образцами проявляется в угловом поведении положения пика $A_g^2$. В стехиометрическом образце 2 наблюдается угловая зависимость его резонансной частоты с амплитудой $\sim 1.5\,\text{cm}^{-1}$ (рис. 6, $e$), в то время как в дефектном образце 1 эта

зависимость практически отсутствует. Это наблюдение нельзя объяснить в рамках классической теории рассеяния КРС, где положение пика определяется только фононной дисперсией. Подобный эффект наблюдался ранее в резонансных условиях, когда энергия возбуждающего фотона близка к межзонному переходу в материале ($\sim 2.0-2.2$ eV для CrSBr [10,13]). В работе [13] показано, что именно мода $A_g^2$ в CrSBr проявляет резонансное переключение поляризации при пороговой мощности лазера и является чувствительной к анизотропии электронной структуры. При энергии 2.33 eV ее отклик определяется комплексными элементами тензора КРС и фазовым сдвигом между компонентами $R_{xx}$ и $R_{yy}$. В результате эффективная частота фонона становится зависимой от угла между поляризацией света и кристаллографическими осями. Наблюдение угловой зависимости резонансной частоты подтверждает наличие этого эффекта в высококачественных кристаллах 2. Отсутствие такой зависимости в дефектном образце 1 объясняется двумя факторами. Во-первых, дефицит брома и присутствие примесной фазы $Cr_2S_3$ разрушают локальную кристаллическую симметрию и подавляют когерентное электронное состояние, необходимое для резонансного усиления. Во-вторых, поликристаллическая структура образца приводит к усреднению сигнала по множеству дезориентированных зерен. Даже если отдельные домены проявляют анизотропный отклик, их вклад в суммарный спектр взаимно компенсируется. Анализ формы линии $A_g^2$ показал, что она ближе к Гауссовой форме, чем к Лоренцевой, что говорит о неоднородном уширении, связанном с вариациями спектров КРС в разных участках образца.

Таким образом, наличие или отсутствие угловой зависимости частоты пика $A_g^2$ служит прямым и высокочувствительным критерием кристаллического качества. В отличие от анализа интенсивности или ширины пиков, этот параметр несет информацию не только о структурных, но и об электронных свойствах материала, включая квази-одномерность электрических свойств [10,13].

### 3.4. Деградация на воздухе

Дополнительные измерения образца 2, проведенные через месяц после механического расщепления, представленные на рис. 7, показали возникновение слабого, но воспроизводимого пика D1. Это свидетельствует о том, что даже стехиометрически правильные кристаллы CrSBr подвержены деградации на воздухе, которая проявляется в образовании вакансий брома. Кроме сублимации брома, еще и окисление оказывает влияние не только на поверхностные слои, но и способствует формированию внутрислойных дефектов, затрагивающих атомы хрома и серы, что изменяет пик D3.

Через 6 месяцев после расщепления на поверхности кристалла наблюдались видимые включения коричнево-желтого цвета (рис. 7, *d*). Спектр КРС поверхности образца, представленный на рис. 7, *c*, показывает появление новых фаз. В спектре появляются два дополнительных пика при $\sim 307\,\mathrm{cm}^{-1}$ и $\sim 370\,\mathrm{cm}^{-1}$. Пик с центром при $307\,\mathrm{cm}^{-1}$, характерный для оксида хрома $Cr_2O_3$ [18], указывает на окисление приповерхностных слоев образца на открытом воздухе. Пик при $370\,\mathrm{cm}^{-1}$ в сочетании с уширением линий при $\sim 244\,\mathrm{cm}^{-1}$ и $\sim 344\,\mathrm{cm}^{-1}$ может быть связан с образованием бромдефицитной фазы $Cr_2S_3$ [17].

## 4. Заключение

В данной работе методами EDX и поляризационно-разрешенной спектроскопии КРС исследовано влияние стехиометрических дефектов на оптические свойства кристаллов CrSBr. Установлено, что дефицит брома приводит к снижению интенсивности и уширению основных пиков $A_g^i$, а окисление поверхности вызывает появление характерной моды дефектов D1. Зависимости параметров спектров КРС от угла между плоскостью поляризации света и кристаллографическими осями подтвердило орторомбическую симметрию стехиометрических и нестехиометрических образцов. Неоднородное уширение пиков в нестехиометрическом образце говорит о вариациях условий КРС в разных участках образца.

Спектроскопия КРС, особенно в сочетании с изучением угловой зависимости спектра, является экспресс-методом контроля качества кристаллов CrSBr. Наличие/отсутствие моды D1, синусоидальная зависимость интенсивности мод $A_g^i$ и стабильность их положения по частоте могут служить надежными критериями для отбора образцов перед использованием в готовых устройствах или проведения других исследований. Это особенно важно для воспроизводимости результатов в исследованиях, посвященных спин-фононному взаимодействию и магнитным фазовым переходам в этом перспективном материале.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 25-72-31032, https://rscf.ru/project/25-72-31032/.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. Science **306**, 666 (2004).

[2] A. Liu, X. Zhang, Z. Liu, X. Xuan, B.I. Yakobson, M.C. Hersam, W. Guo. Nano-Micro Lett. **16**, 119 (2024).

[3] B. Huang, G. Clark, E. Navarro-Moratalla, D.R. Klein, R. Cheng, K.L. Seyler, D. Zhong, E. Schmidgall, M.A. McGuire, D.H. Cobden, W. Yao, D. Xiao, P. Jarillo-Herrero, X. Xu. Nature **546**, 270 (2017).

[4] C. Gong, L. Li, Z. Li, H. Ji, A. Stern, Y. Xia, T. Cao, W. Bao, C. Wang, Y. Wang, Z.Q. Qiu, R.J. Cava, S.G. Louie, J. Xia, X. Zhang. Nature **546**, 265 (2017).
[5] E.J. Telford, A.H. Dismukes, K. Lee, R.A. Wiscons, J. Wang, X. Xu, C. Nuckolls, C.R. Dean, X. Roy, X. Zhu. Adv. Mater. **32**, 2003240 (2020).
[6] K. Lee, A.H. Dismukes, E.J. Telford, R.A. Wiscons, J. Wang, X. Xu, C. Nuckolls, C.R. Dean, X. Roy, X. Zhu. Nano Lett. **21**, 3511 (2021).
[7] M.A. Pimenta, G.C. Resende, H.B. Ribeiro, B.R. Carvalho. Phys. Chem. Chem. Phys. **23**, 27103 (2021).
[8] H.B. Ribeiro, M.A. Pimenta, C.J.S. de Matos, R.L. Moreira, A.S. Rodin, J.D. Zapata, E.A.T. de Souza, A.H.C. Neto. ACS Nano **9**, 4270 (2015).
[9] N. Mao, X. Wang, Y. Lin, B.G. Sumpter, Q. Ji, T. Palacios, S. Huang, V. Meunier, M.S. Dresselhaus, W.A. Tisdale, L. Liang, X. Ling, J. Kong. J. Am. Chem. Soc. **141**, 18994 (2019).
[10] K. Torres, A. Kuc, L. Maschio, T. Pham, K. Reidy, L. Dekanovsky, Z. Sofer, F.M. Ross, J. Klein. Adv. Funct. Mater. **33**, 2211366 (2023).
[11] J. Klein, Z. Song, B. Pingault, F. Dirnberger, H. Chi, J.B. Curtis, R. Dana, R. Bushati, J. Quan, L. Dekanovsky, Z. Sofer, F.M. Ross. Nano Lett. **13**, 5092 (2022).
[12] A. Gayen, G.H. An, I.N. Rahman, M. Choi, Q. Mustaghfiroh, P.V. Gaikwad, E.S.H. Kang, K.-H. Kim, C. Liu, K. Kim, J. Bang, H.S. Lee, D.-H. Kim. Nanoscale **16**, 17452 (2024).
[13] P. Mondal, D.I. Markina, L. Hopf, L. Krelle, S. Shradha, J. Klein, M.M. Glazov, I. Gerber, K. Hagmann, R.V. Klitzing, K. Mosina, Z. Sofer, B. Urbaszek. npj 2D Mater. Appl. **9**, 22 (2025).
[14] Д.Л. Гусенков, Р.А. Валеев, В.П. Пискорский, А.И. Чернов, Р.Б. Моргунов. ФТТ **67**, *2*, 295 (2025).
[15] D.L. Gusenkov, A.I. Tiurin, M.V. Bakhmetiev, E.I. Kunitsyna, E.O. Chiglintsev, M.K. Tatmyshevskiy, A.I. Chernov, R.B. Morgunov. J. Phys. Chem. Solids **199**, 112589 (2025).
[16] E.J. Telford, D.G. Chica, M.E. Ziebel, K. Xie, N.S. Manganaro, C. Huang, J. Cox, A.H. Dismukes, X. Zhu, J.P.S. Walsh, T. Cao, C.R. Dean, X. Roy. Adv. Phys. Res. **2**, 2300036 (2023).
[17] L. Xie, J. Wang, J. Li, C. Li, Y. Zhang, B. Zhu, Y. Guo, Z. Wang, K. Zhang. Adv. Electron. Mater. **7**, 2000962 (2020).
[18] S.-H. Shim, T.S. Duffy, R. Jeanloz, C.-S. Yoo, V. Iota. Phys. Rev. B **69**, 144107 (2004).

*Редактор А.Н. Смирнов*