

ОПТИКА И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 538.9

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОЙ ФАЗЫ EuS_2
ВБЛИЗИ НЕПРЯМОГО КРАЯ СОБСТВЕННОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ**С. Н. Николаев¹, В. С. Кривобок¹, И. И. Усманов¹, Е. А. Екимов^{1,2}

Методом микроскопии отражения в видимом и ближнем ИК-диапазоне исследованы оптические свойства чешуек EuS_2 . Показано, что при малой площади чешуек спектры микроотражения описываются в модели, сочетающей отражение света как от структуры “пленка-подложка”, так и от подложки. По спектрам микроотражения определен не прямой край собственного поглощения $E_g = 0.83$ эВ и определен коэффициент преломления света ниже края собственного поглощения $n = 2.9$.

Ключевые слова: дисульфид европия, микроотражение, слоистые полупроводники.

Введение. Дихалькогениды переходных металлов, активно изучаемые в последние годы, представляют большой интерес для науки благодаря своим уникальным свойствам, которые находят применение в различных областях [1–4]. С практической точки зрения представляет интерес поиск новых слоистых материалов с шириной запрещенной зоны < 1 эВ, которые могут стать основой для оптоэлектронных устройств, работающих в ИК-диапазоне спектра.

Недавно впервые была синтезирована слоистая фаза EuS_2 [5]. На основе температурной зависимости проводимости и расчетов из первых принципов авторы [5] показали, что этот материал является полупроводником с шириной запрещенной зоны 0.9 эВ. Исследование оптических свойств этого материала показало, что прямой край собственного поглощения во флэях EuS_2 толщиной 1–2 мкм лежит в области 700 нм [6], что

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nikolaev-s@yandex.ru.

² Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, 142190 Россия, г. Троицк, Москва, Калужское ш., 14.

согласуется с расчетной зонной структурой. В данной работе исследовались оптические свойства пленок EuS_2 , перенесенных на подложки Si, в широком спектральном диапазоне (400–1650 нм).

Описание эксперимента. Исследования проводились на пленках EuS_2 с толщиной от нескольких микрон до 20 микрон, перенесенных на подложки Si, после механического расщепления липкой лентой. Объемные кристаллы EuS_2 были выращены методом высокого давления и температуры (НРНТ) при давлении 8–9 ГПа и температуре 1250 °С. Более подробно процесс получения образцов, их перенос на подложки, а также структурные свойства материала представлены в [5].

Спектроскопия фотолюминесценции в области непрямого края собственного поглощения оказалась неинформативна, поэтому основным методом определения оптических параметров пленок EuS_2 была выбрана спектроскопия микроотражения. Для этого излучение лампы накаливания коллимировалось и направлялось на объектив, который фокусировал излучение на поверхность образца. В качестве системы регистрации использовался решеточный спектрометр Acton Princeton Instruments, оснащенный кремниевой ПЗС-матрицей PyLoN и фотоумножителем Hamamatsu, работающим в диапазоне 0.95–1.7 мкм.

Чтобы учесть аппаратную функцию установки, последовательно измерялись спектры отражения чешуек и чистой поверхности подложки в идентичной геометрии. Далее везде будут анализироваться относительные спектры отражения, полученные после деления друг на друга спектров отражения пленок EuS_2 и подложки Si.

Результаты и обсуждение. На рис. 1(а), (b), (d), (e) показаны относительные спектры отражения двух чешуек EuS_2 толщиной 7.8 и 13 мкм в спектральном диапазоне 400–1650 нм. Видно, что во всем диапазоне измерений в спектре наблюдаются интерференционные осцилляции сигнала. Если коэффициент преломления EuS_2 меняется не слишком резко, то его спектральную зависимость можно определить по относительным сдвигам максимумов и минимумов в интерференционной картине коэффициента отражения. Учитывая, что порядок интерференции в соседних экстремумах отличается на $1/2$, можно вычислять показатель преломления по приближенной формуле

$$n = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda 2d},$$

где $\Delta\lambda$ – разность длин волн максимума и минимума, λ – средняя длина волны, d – толщины пленки EuS_2 . Результаты определения показателя преломления таким образом представлены на рис. 1(с). Показатель преломления, равный 1, указывает на то, что ин-

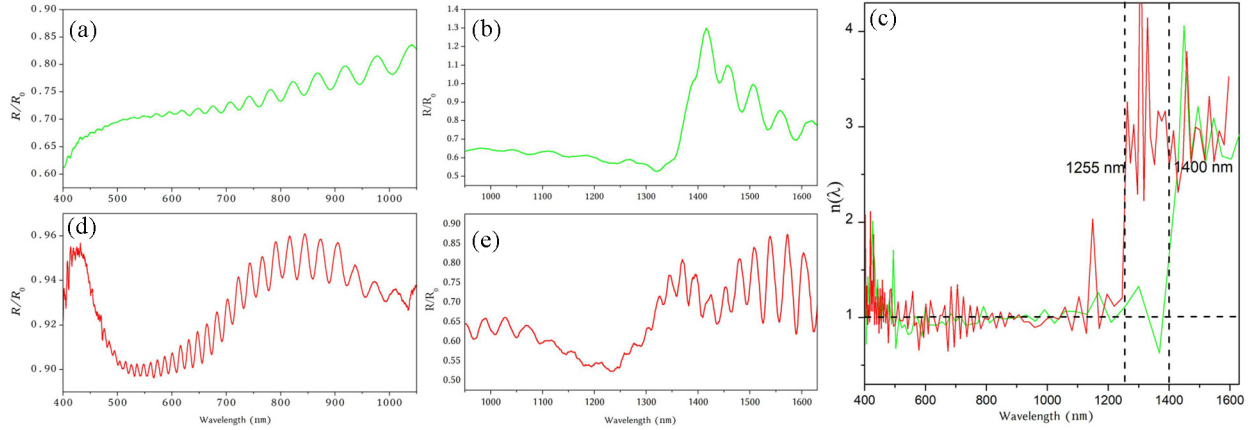


Рис. 1: Спектры микроотражения, записанные при комнатной температуре для пленки толщиной ≈ 7.8 мкм ((a), (b)) и ≈ 13 мкм ((d), (e)), нормированные на спектр микроотражения подложки; (c) зависимости показателя преломления пленок от длины волны. Числовые величины обозначают примерные положения пересечения вертикальных штриховых прямых с осями абсцисс. Горизонтальные штриховые прямые обозначают уровень $n = 1$.

терферирует свет, отраженный от подложки, и свет, отраженный от поверхности пленки EuS_2 . Такой эффект возможен для фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны, когда свет практически полностью поглощается в чешуйке. С помощью фильтрации фурье-компонент удалось разделить вклад интерференции снаружи и внутри пленки, что позволило расширить спектральный диапазон определения показателя преломления для чешуйки № 2. Оба подхода указывают на то, что диэлектрическая постоянная слабо меняется в исследованном диапазоне и составляет 2.85–2.9.

Из тех же спектров можно определить коэффициент экстинкции k пленок EuS_2 по спектральной зависимости глубины интерференционных особенностей. Известно, что для непрямозонных полупроводников коэффициент поглощения вблизи края собственного поглощения имеет квадратичную зависимость от энергии $\alpha \propto (E - E_0)^2$ [7]. Для определения ширины запрещенной зоны кривые $\sqrt{k}$ были экстраполированы прямыми (см. рис. 2). В зависимости от того, происходит ли процесс поглощения фотонов с испусканием фононов или их поглощением, точка пересечения этих прямых с осью абсцисс может соответствовать энергии $E_g \pm \hbar\Omega$, где Ω – частота оптического фонона. В процессах комбинационного рассеяния света в EuS_2 наиболее выражены фононы с энергией ~ 50 мэВ; ИК-активные фононы и фононные моды с большой плотностью

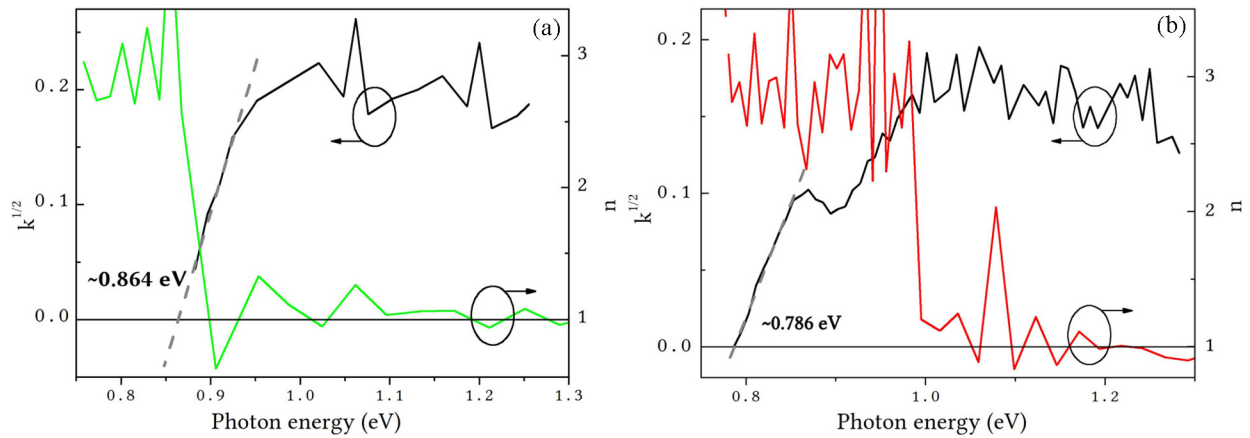


Рис. 2: Показатели преломления (зелёная и красная кривые) и корень из коэффициентов экстинкции (чёрные кривые) для двух образцов с толщиной (a) 7.8 мкм и (b) 13 мкм. Числовые величины обозначают примерные положения точек пересечения аппроксимационных прямых (штриховые линии) с осями абсцисс.

состояний согласно расчетам имеют несколько меньшую энергию [5]. При комнатной температуре возможны как стоксовы, так и антистоксовы процессы поглощения. При этом для разных чешуек наблюдается достаточно заметное отклонение в положении края собственного поглощения (0.786 и 0.864 эВ). Такое различие можно объяснить в предположении разной эффективности охлаждения чешуек и, как следствие, преобладании стоксовой и антистоксовой компонент для каждого образца. Тогда разница между энергиями 78 мэВ равна удвоенной энергии фонона, участвующего в процессах поглощения света, а $E_g = 0.828$ эВ.

Заключение. Были исследованы спектры микроотражения чешуек EuS_2 на подложках Si в широком спектральном диапазоне (400–1650 нм). Обнаружена интерференционная структура как в видимой, так и в ИК-области спектра. Анализ спектрального положения и глубины интерференционных особенностей позволил определить спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции вблизи непрямого края собственного поглощения. Показано, что в области прозрачности EuS_2 показатель преломления меняется незначительно и равен $n = 2.85\text{--}2.9$. По квадратичной особенности в коэффициенте экстинкции определена ширина непрямой запрещенной зоны EuS_2 $E_g = 0.828$ эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-22-00444).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, et al., Nano Lett. **10**, 1271 (2010). <https://doi.org/10.1021/nl903868w>.
- [2] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, et al., Nat. Nanotech. **6**, 147 (2011). <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.279>.
- [3] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, et al., Nat. Nanotech. **8**, 497 (2013). <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.100>.
- [4] С. Н. Николаев, В. С. Кривобок, М. А. Чернопицкий и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(4), 21 (2024). DOI: 10.3103/S1068335623602182.
- [5] E. A. Ekimov, S. N. Nikolaev, A. G. Ivanova, et al., CrystEngComm **25**, 2966 (2023). <https://doi.org/10.1039/D2CE01647H>.
- [6] Е. А. Екимов, С. Н. Николаев, М. В. Кондрин, В. С. Кривобок, Письма в ЖЭТФ **118**, 263 (2023). <https://doi.org/10.31857/S1234567823160073>.
- [7] П. Ю. М. Кардона, *Основы физики полупроводников*, 3-е изд. (М., Физматлит, 2002). – 560 с. ISBN: 5-9221-0268-0.

Поступила в редакцию 10 декабря 2024 г.

После доработки 26 декабря 2024 г.

Принята к публикации 28 декабря 2024 г.