

# Интегральная фотоника на основе анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов

*А. А. Вишневый, Г. Ермолаев, Д. Грудинин, И. Круглов, А. Арсенин, В. Волков*

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Дубай, ОАЭ

Ван-дер-ваальсовы материалы, интерес к которым не снижается после получения графена, можно использовать не только в качестве слоев толщиной в один атом. Их объемные кристаллы обладают рекордно высокими показателями преломления и гигантской анизотропией оптических свойств, что потенциально позволит создавать сверхкомпактные интегральные фотонные схемы для оптической обработки информации. Мы показываем, что гигантская анизотропия оптических свойств является значительным преимуществом таких материалов, позволяющим дополнительно уменьшать перекрестные помехи между волноводами. Разнообразие материалов позволяет найти подходящие решения для любого рабочего диапазона в оптической области.

*Ключевые слова:* Дихалькогениды переходных металлов, Гексагональный нитрид бора, Модовая площадь, Перекрестные помехи, Плотность интеграции.

*Цитирование:* Вишневый, А. А. Интегральная фотоника на основе анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов / А. А. Вишневый, Г. Ермолаев, Д. Грудинин, И. Круглов, А. Арсенин, В. Волков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 229–231.

С момента изоляции и изучения свойств графена — атомарно тонкого слоя графита, интерес к двумерным материалам находится на очень высоком уровне. Их список постоянно пополняется, однако не только атомарно тонкие пленки этих материалов представляют интерес. Многие объемные кристаллы двумерных материалов обладают уникальными оптическими свойствами, характеризующимися сильным экситонным оптическим откликом в плоскости атомарных слоев и более слабым откликом по нормали к слоям. Это приводит к рекордно высоким значениям показателей преломления среди материалов, прозрачных в том же спектральном интервале, и гигантской оптической анизотропии [1].

Развитие современной интегральной кремниевой фотоники предопределялось не только развитой в микроэлектронике технологией создания кремниевых наноструктур, но и высоким показателем преломления  $\sim 3,5$  и прозрачностью в ближнем инфракрасном диапазоне. Благодаря этому создается большой контраст показателей преломления в ядре и обкладке интегрального кремниевого волновода, что позволяет передавать оптические сигналы по волноводам с поперечным сечением субмикронного размера. Тем не менее, размеры волнопроводов все еще остаются значительно выше, чем у электронных компонентов, что ограничивает производительность фотонных интегральных схем.

Такие материалы как дисульфид молибдена и вольфрама, а также диселенид молибдена обладают показателем преломления более 4, что в перспективе может позволить дополнительно уменьшить физический размер волнопроводов. Тем не менее, по нормали к

атомарным плоскостям показатель преломления является не столь высоким. Кроме того, хорошо исследованы волноводы из изотропных материалов, а является ли влияние гигантской оптической анизотропии позитивным или отрицательным пока не известно.

Для определения влияния оптической анизотропии на свойства волноводов были теоретически исследованы волноводы прямоугольного сечения на подложке из  $\text{SiO}_2$ . Отметим, что кристаллы ван-дер-ваальсовых материалов совместимы с любыми подложками, в отличие от традиционных полупроводниковых соединений, требующих, чтобы постоянная решетки подложки совпадала с таковой у материала. Изучалась зависимость модовой площади, эффективного показателя преломления и перекрестных помех в зависимости от размеров волновода. Необходимость исследования перекрестных помех связана с тем, что именно они, а не физический размер волновода определяют насколько близко волноводы могут находиться друг к другу в интегральной фотонной схеме, а следовательно, и ее производительность. Также исследовался модовый состав волноводов, поскольку для передачи данных более пригодны одномодовые волноводы. Проведено сравнение характеристик волноводов из анизотропного материала и изотропного с показателем преломления, равным компоненте показателя преломления анизотропного материала в направлении атомарных плоскостей.

В ходе исследования было установлено, что параметры волноводов, при которых достигается минимальная модовая площадь, не являются оптимальными для минимизации перекрестных помех. При этом, для перекрестные помехи тем слабее, чем выше эффективный показатель преломления волноводной моды. Для получения большего эффективного показателя преломления физический размер ядра волновода стоит делать больше, откуда следует, что волноводы с большим размером ядра можно плотнее располагать на поверхности чипа. Размер же ядра ограничен требованием на одномодовость волновода. Анизотропия оптических свойств практически не влияет на фундаментальную волноводную моду, поскольку в ней электрическое поле ориентировано вдоль атомарных плоскостей, однако существенно уменьшает эффективный показатель преломления мод более высокого порядка. Таким образом, за счет анизотропии можно поддерживать одномодовый режим в более крупных волноводах, за счет чего достичь более высокого эффективного показателя преломления. Особый интерес представляет использование hBN в ультрафиолетовой области спектра, где материал является прозрачным, оптически анизотропным и обладает максимальным показателем преломления. Более подробно результаты работы изложены в публикациях [2,3].

### Список источников

- [1] **Ermolaev, G. A.** Giant optical anisotropy in transition metal dichalcogenides for next-generation photonics. / G. A. Ermolaev, D. V. Grudin, Y. V. Stebunov, K. V. Voronin, V. G. Kravets, J. Duan, A. B. Mazitov, G. I. Tselikov, A. Bylinkin, D. I. Yakubovsky, S. M. Novikov, D. G. Baranov, A. Y. Nikitin, I. A. Kruglov, T. Shegai, P. Alonso-González, A. N. Grigorenko, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, V. S. Volkov // Nature Communications. — 2021. — Vol. 12. — P. 854.

- [2] **Vyshnevyy, A. A.** A hidden advantage of van der Waals materials for overcoming limitations in photonic integrated circuitry / A. A. Vyshnevyy, G. A. Ermolaev, D. V. Grudinin, K. V. Voronin, I. Kharichkin, A. Mazitov, I. A. Kruglov, D. I. Yakubovsky, P. Mishra, R. V. Kirtaev, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, L. Martin-Moreno, V. S. Volkov // arxiv:2304.00131 — 2023.
- [3] **Grudinin, D. V.** Hexagonal boron nitride nanophotonics: a record-breaking material for the ultraviolet and visible spectral ranges / D. V. Grudinin, G. A. Ermolaev, D. G. Baranov, A. N. Toksumakov, K. V. Voronin, A. S. Slavich, A. A. Vyshnevyy, A. B. Mazitov, I. A. Kruglov, D. A. Ghazaryan, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, V. S. Volkov // Materials Horizons. — 2023. — Vol. 10. — P. 2427–2435.

## **Integrated photonics based on anisotropic van der Waals materials**

*A. A. Vyshnevyy, G. Ermolaev, D. Grudinin, I. Kruglov, A. Arsenin, V. Volkov*

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Van der Waals materials, the interest in which has not diminished since graphene was obtained, can be used not only as one-atom-thick layers. Their bulk crystals have record-high refractive indices and giant anisotropy of optical properties, which will potentially enable ultra-compact integrated photonic circuits for optical information processing. We show that the giant anisotropy of optical properties is a significant advantage of such materials, further reducing crosstalk between waveguides. The variety of materials makes it possible to find suitable solutions for any operating range in the optical domain.

*Keywords:* Transition metal dichalcogenides, Hexagonal boron nitride, Mode area, Crosstalk, Integration density.