Возникновение спинового и орбитального углового момента света в закрученных фотонных структурах

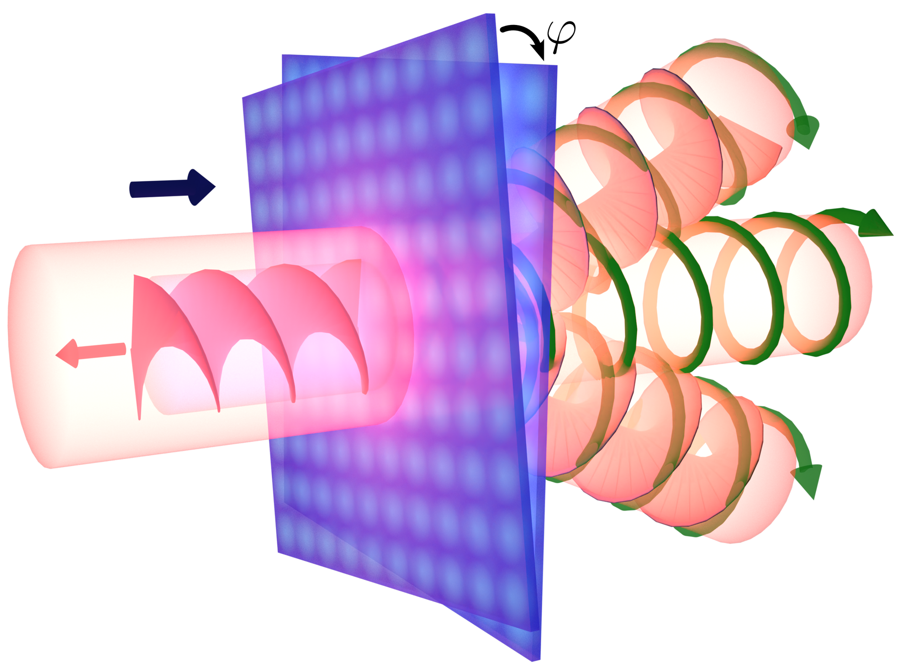
Е.С. Вяткин, А.В. Пошакинский, С.А. Тарасенко

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, egor.vyatkin@bk.ru

Аннотация

Оптическими аналогами полупроводниковых ван-дер-ваальсовых структур являются фотонные структуры, состоящие из двух или нескольких слоев с латеральной модуляцией диэлектрической проницаемости, которые взаимодействуют через ближние поля. Мы демонстрируем оптическую активность и циркулярный дихроизм таких скрученных метаповерхностей, состоящих из оптически изотропных слоев. Кроме того, отраженный от метаповерхности пучок приобретает орбитальный угловой момент, а рассеяние на муаре приводит к возникновению дифрагированных на малый угол лучей, обладающих частичной циркулярной поляризацией и орбитальным моментом.

Модель



На систему налетает гауссов пучок ширины a

$$\boldsymbol{E}_{\text{in}}(\boldsymbol{r}) = \int \boldsymbol{E}_0(\boldsymbol{q}_\parallel) e^{i(\boldsymbol{q}_\parallel \cdot \boldsymbol{\rho} + q_z z)} d\boldsymbol{q}_\parallel$$

где

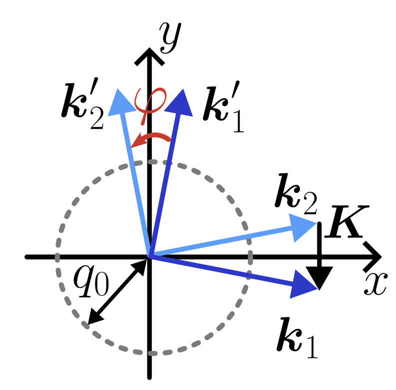
$$\boldsymbol{E}_0(\boldsymbol{q}_\parallel) \propto e^{-a^2(q_x^2+q_y^2)/2} \boldsymbol{e}_0$$

Волновое уравнение

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot} \boldsymbol{E} - q_0^2 \boldsymbol{E} = 4\pi q_0^2 \left[\boldsymbol{P}^{(1)}\delta(z) + \boldsymbol{P}^{(2)}\delta(z-d)\right] \quad (q_0 = \omega/c)$$

С поляризацией в каждом слое

$$\boldsymbol{P}^{(j)} = \left[\alpha_0 + 2\alpha_1(\cos \boldsymbol{k}_j \boldsymbol{\rho} + \cos \boldsymbol{k}'_j \boldsymbol{\rho})\right] \boldsymbol{E}_\parallel(\boldsymbol{\rho}, z_j) \,.$$



Раскладываем поле и поляризацию в сумму по волновым векторам дифракции $\boldsymbol{g}$

$$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{q}_\parallel}(\boldsymbol{r}) = \sum_{\boldsymbol{g}} \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}}(z) e^{i\boldsymbol{g}\boldsymbol{\rho}} \,, \quad \boldsymbol{g} = n_1 \boldsymbol{k}_1 + n_1' \boldsymbol{k}_1' + n_2 \boldsymbol{k}_2 + n_2' \boldsymbol{k}_2' \,.$$

Решение можно представить в виде

$$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{q}_\parallel}(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{E}_0 + \sum_{\boldsymbol{g}} \mathcal{D}(\boldsymbol{q}_\parallel + \boldsymbol{g}) e^{i\boldsymbol{g}\boldsymbol{\rho}} \left(\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{g}}^1 e^{iq_z|z|} + \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{g}}^2 e^{iq_z|z-d|}\right) \,,$$

где

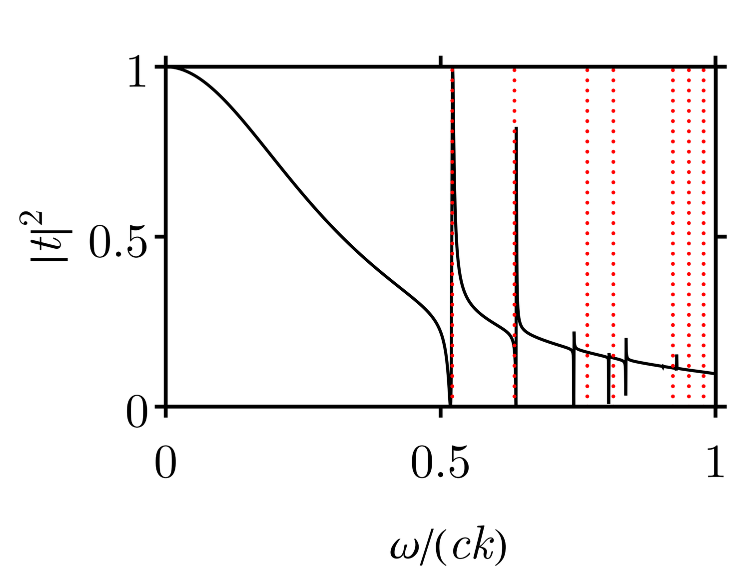
$$\mathcal{D}(\boldsymbol{q}) = \frac{2\pi i}{q_z}\left(k_0^2 - \boldsymbol{q} \otimes \boldsymbol{q}\right) \,, \quad q_z = \sqrt{q_0^2 - q^2} \,,$$

а поляризация определяется напряженностью поля в точках $z_1 = 0$ и $z_2 = d$

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{g}}^i = \left(\alpha_0 \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}} + \alpha_1 \left[\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}-\boldsymbol{k}_i} + \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}+\boldsymbol{g}} + \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}-\boldsymbol{k}_i'} + \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{g}+\boldsymbol{k}_i'}\right]\right)\Big|_{z=z_i} \,.$$

Прохождение света через один слой

Спектр пропускания



Коэффициент прохождения без резонансов ($\alpha_1 = 0$)

$$|t|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi\alpha_0\omega/c)^2}$$

Волноводная мода в слое

$$\omega/c = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi\alpha_0}\sqrt{\sqrt{1+(4\pi\alpha_0 q)^2} - 1}$$

с волновым вектором в плоскости

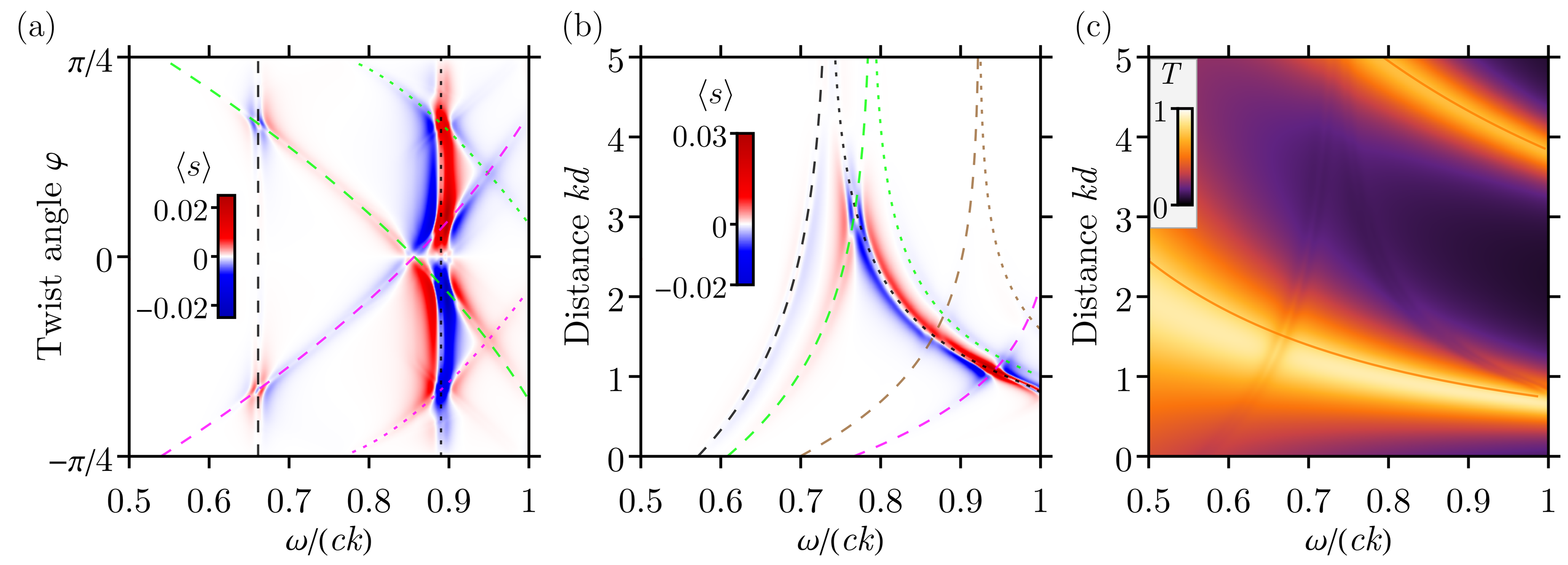
$$q^2 = (n^2 + m^2)k^2$$

S.V. Lobanov, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius et al., Phys. Rev. B **92**, 205309 (2015).

A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina, S.A. Tarasenko, Nanophotonics **7**, 753 (2018).

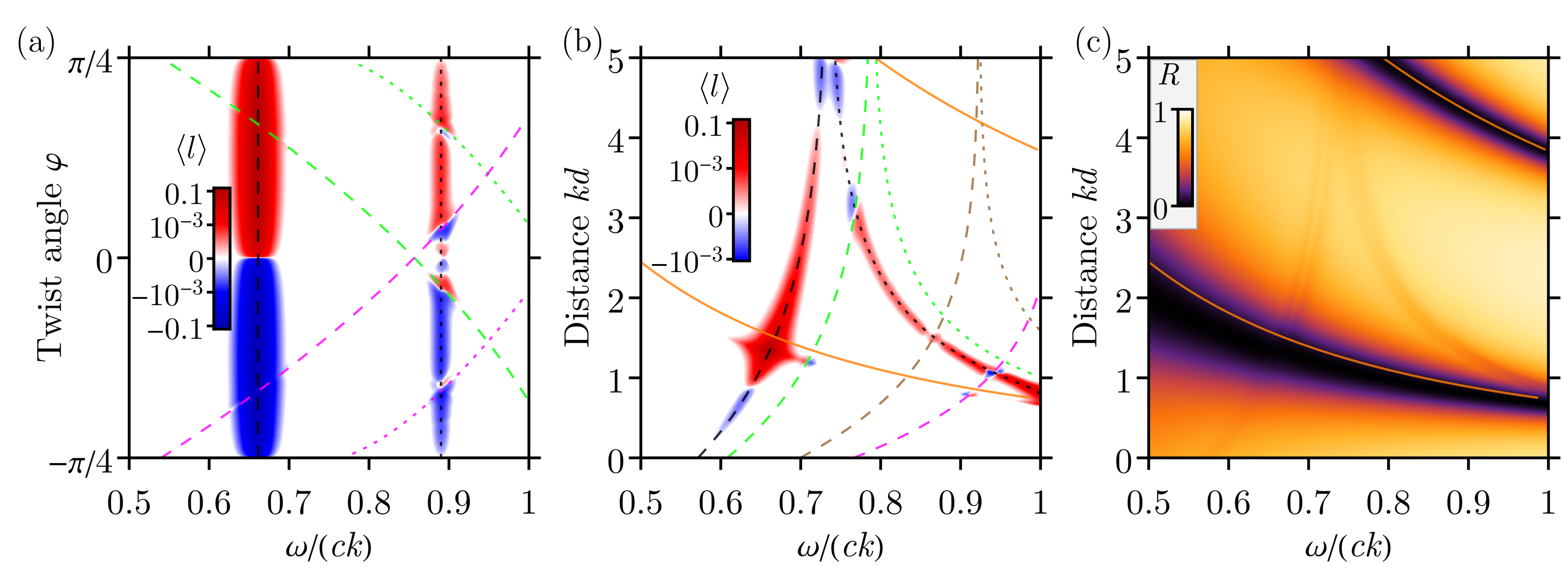
B. Lou, N. Zhao, M. Minkov et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 136101 (2021).

Прошедший и отраженный пучки



Циркулярная поляризация прошедшего пучка вдали от волноводных резонансов ($\alpha_0 k \to 0$) и малом угле скручивания $\varphi \ll 1$

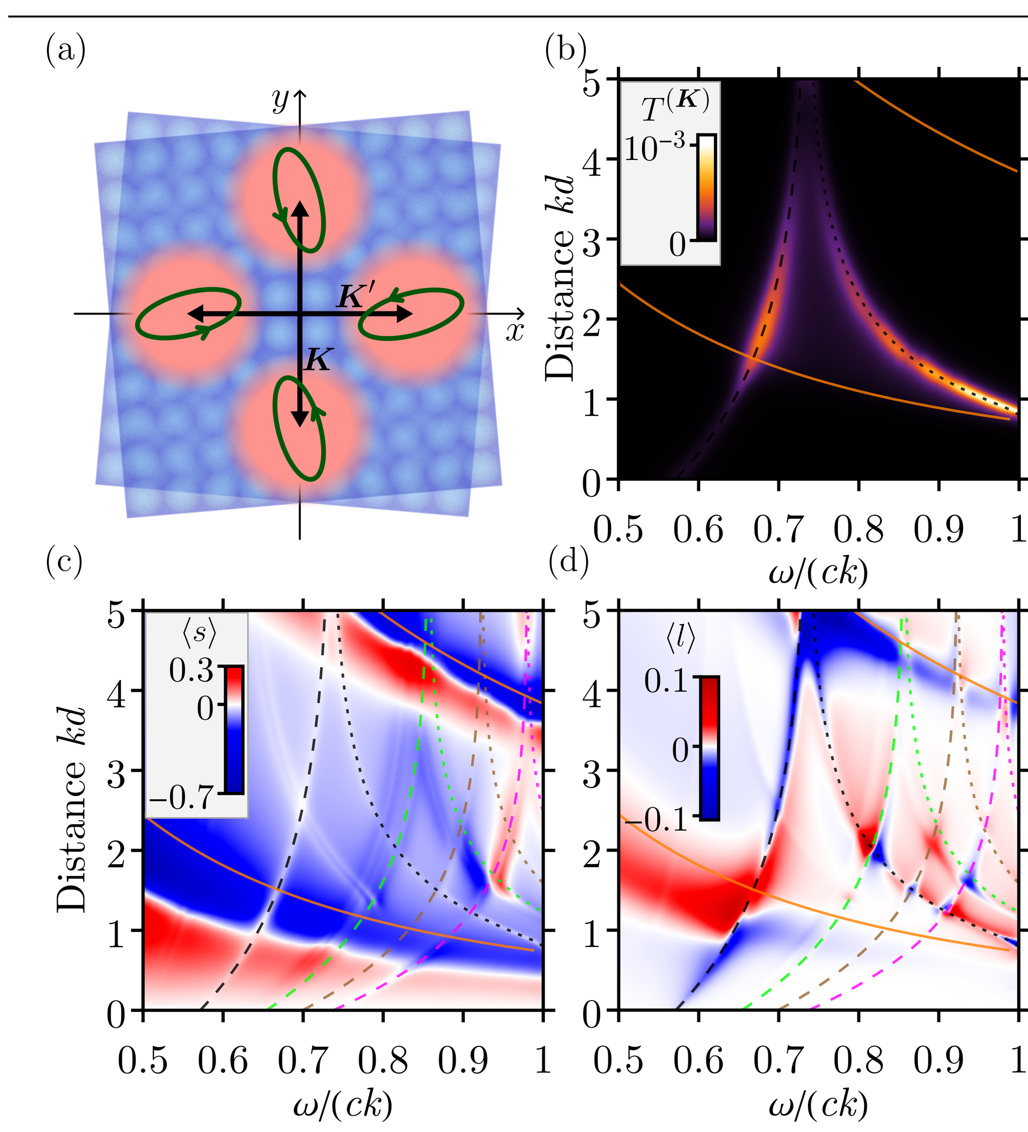
$$\langle s \rangle = 4(2\pi\alpha_1 k)^4 \varphi \frac{q_0^2 e^{-2\varkappa d}}{k^2 - q_0^2} \sin(2q_0 d) \,, \quad \varkappa = \sqrt{k^2 - q_0^2}$$



Среднее значение проекции орбитального углового момента отраженного пучка

$$\langle l \rangle = -\frac{9\pi^2\alpha_1^4 k^8}{2\alpha_0^2 a^4 (k^2 - q_0^2)^5} \sin(4\varphi) \tan(q_0 d)$$

Дифракция на муаре



За счет рассеяния на муаре могут возникать дифрагированные на малый угол пучки, обладающие спиновым и орбитальным угловым моментом

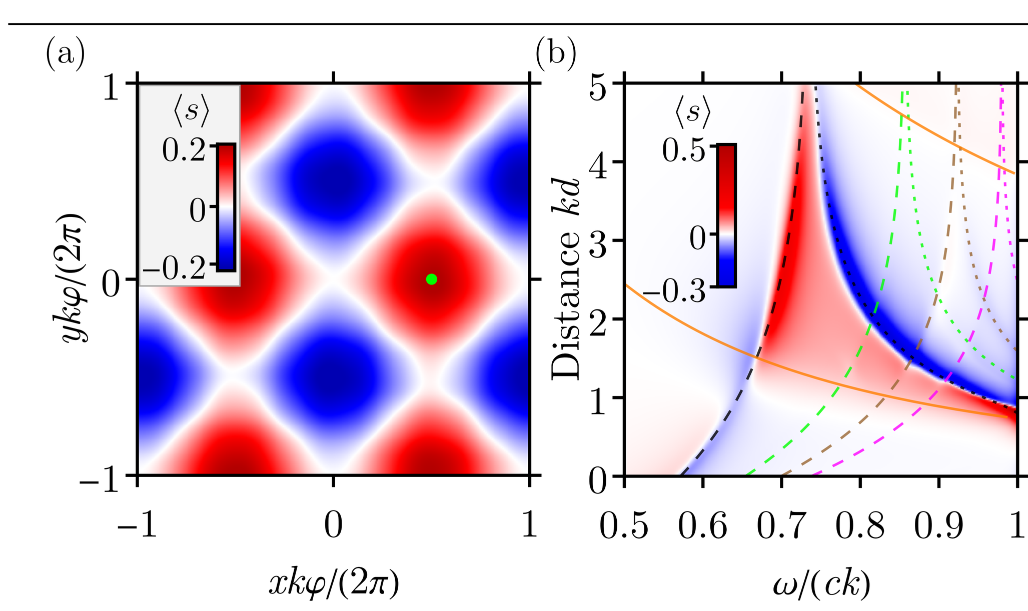
Спиновый момент

$$\langle s \rangle = \frac{\varphi \tan(q_0 d) k^4}{((k^2 - q_0^2)^2 + q_0^4)}$$

Орбитальный момент

$$\langle l \rangle = -\frac{\varphi \tan(q_0 d) k^2 \left(k^4 - 6k^2 q_0^2 + 4q_0^4\right)}{a^2 \, (k^2 - q_0^2)^2 \left((k^2 - q_0^2)^2 + q_0^4\right)}$$

Зона интерференции



Интерференция опорного и дифрагированных пучков приводит к осцилляциям степени циркулярной поляризации света в плоскости слоев

$$\langle s \rangle = (4\pi\alpha_1 k)^2 \frac{q_0}{\varkappa} e^{-\varkappa d} \cos(q_0 d) \sin(2\beta)(\cos(k\varphi y) - \cos(k\varphi x))$$