

## Влияние пространственной дисперсии на оптические свойства полупроводников и наноматериалов

Ю.М. Александров, В.В. Яцышен

Волгоградский государственный университет  
400062, Российская Федерация, г. Волгоград  
Университетский пр., 100

Проведен сравнительный анализ поведения оптических параметров нормальных волн возникающих в среде с пространственной дисперсией для полупроводникового материала – кристалла CdS и наноматериала – силицена. Отмечается необходимость учета пространственной дисперсии при анализе спектров отражения вблизи экситонного резонанса.

*Ключевые слова:* пространственная дисперсия, оптические свойства, полупроводник, наноматериалы, нормальные волны, экситонный резонанс.

В линейной электродинамике электромагнитные свойства среды определяются ее диэлектрической проницаемостью или восприимчивостью, через которую диэлектрическая проницаемость определяется весьма просто. Обычно связь поляризации с полем носит локальный характер. Однако, при исследовании связи между поляризацией  $\vec{P}(\vec{r}, t)$  и полем  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  в общем случае можно сказать, что поляризация в данной точке среды определяется полем в некоторой окрестности этой точки. Такая ситуация возникает в средах, в которых важны процессы переноса частиц среды (например, диффузии). Так, в плазме частицы, попавшие в выделенный объем и определяющие, тем самым, значение поляризации в нем, фактически находились под воздействием поля вне выделенного объема и, согласно законам динамики для частиц в электромагнитном поле, характер движения этих частиц и вся их дальнейшая судьба определяется этим полем. Поэтому ясно, что результирующая поляризация в данной точке будет определяться не только полем в данной точке, но и значением (и, конечно, направлением, что подразумевается) его в некоторой окрестности этой точки. Это как раз и соответствует среде с пространственной дисперсией. При этом, связь между  $\vec{D}(\vec{r}, t)$  и  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  становится нелокальной. Анализ показывает, что нелокальность такой связи может привести к возникновению новых нормальных электромагнитных волн в среде, которые могут быть обнаружены в эксперименте.

При расчете коэффициентов отражения и прохождения для среды с пространственной дисперсией необходимо учитывать влияние поверхности. Это влияние описывается путем введения феноменологических параметров в однородные и неоднородные дополнительные граничные условия.

Нами проведены расчеты влияния ПД на спектры отражения и пропускания для различных материалов, в которых возможны экситонные состояния [1–5]. В качестве примера рассмотрим полупроводниковый кристалл CdS, в котором в области энергий квантов  $h\nu = 2.5524$  эВ возбуждается экситонное состояние. При воздействии на кристалл электромагнитного поля в этом диапазоне в кристалле возбуждается смешанное экситон-фотонное состояние или поляритон. Последний содержит как механическую (экситонную) составляющую, так и электромагнитную.

В случае учета пространственной дисперсии диэлектрическая проницаемость зависит от волнового вектора

Диэлектрическая проницаемость кристалла с учетом пространственной дисперсии:

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \varepsilon_0 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \frac{(kc)^2}{D} - \omega^2 - i\omega\gamma}. \quad (1)$$

Здесь:

$$D = \frac{m_e^* c^2}{\hbar\omega_0} \quad (2)$$

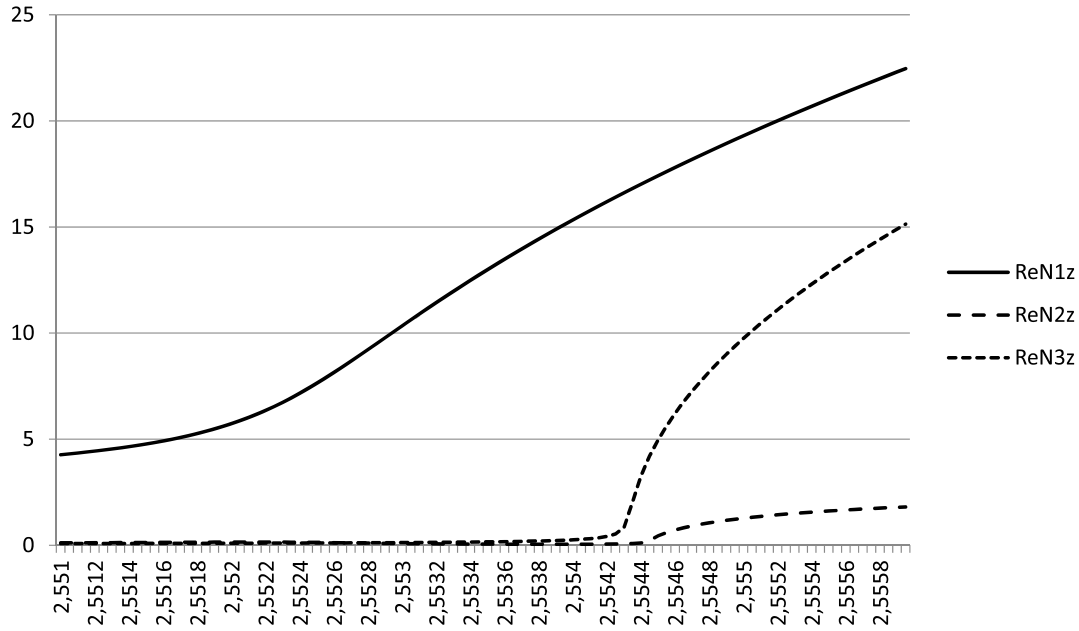


Рис. 1. Зависимость действительных частей  $N_{iz}$  от частоты в эВ для кристалла CdS

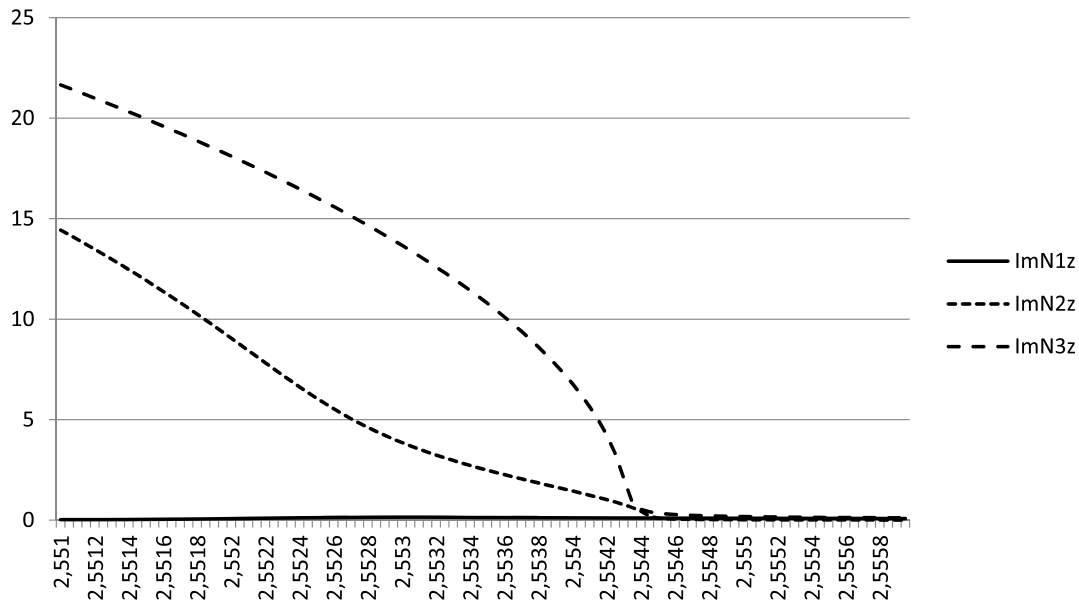


Рис. 2. Зависимость мнимых частей  $N_{iz}$  от частоты в эВ для кристалла CdS

– параметр пространственной дисперсии;  $m_e^*$  – эффективная масса экситона;  $\gamma$  – постоянная затухания;  $k$  – величина волнового вектора;  $\omega_0$  – резонансная частота;  $\omega$  – частота падающего излучения;  $\epsilon_0$  – статическая диэлектрическая проницаемость;  $c$  – скорость света. Параметр  $D$  имеет прозрачный физический смысл – отношение полной энергии экситона к энергии светового кванта.

При наклонном падении световой волны на границу среды с пространственной дисперсией в последней возбуждаются нормальные волны, две из которых являются поперечными. Для них справедливо дисперсионное уравнение

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\omega, \vec{k}). \tag{3}$$

В случае поляризации в среде возбуждается продольная электромагнитная волна, дисперсионное уравнение находится из условия

$$\epsilon(\omega, \vec{k}) = 0. \tag{4}$$

При расчете коэффициентов отражения и прохождения используются однородные дополнительные граничные условия. На рис. 1 изображены зависимость действительных частей величин  $N_{iz}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) от частоты, здесь

$$N_{iz} = \frac{c}{\omega} k_{zi}, \tag{5}$$

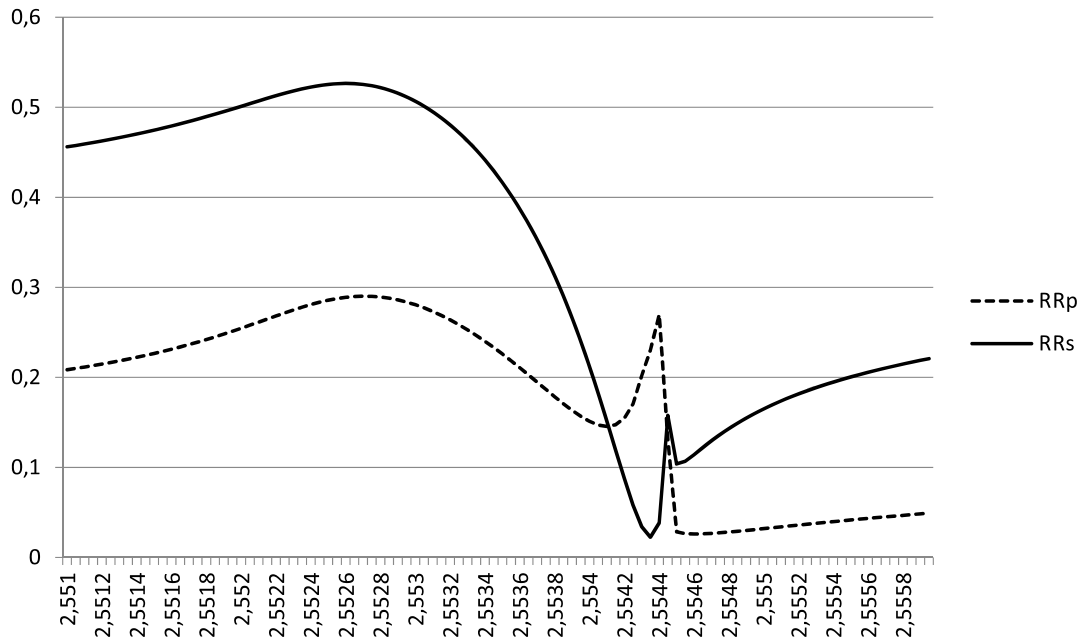


Рис. 3. Спектры отражения для s- и p- поляризации для кристалла CdS

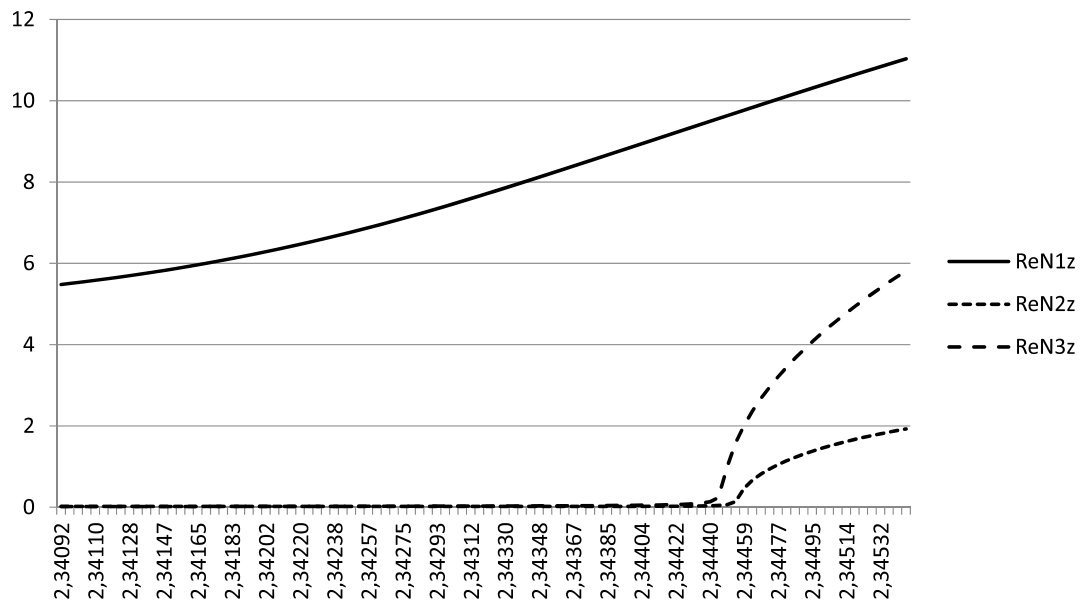


Рис. 4. Зависимость действительных частей  $N_{iz}$  от частоты в эВ для наноматериала силицена

$k_{zi}$  –  $z$ -составляющая волнового вектора  $i$ -й волны;  $i = 1, 2$  – отвечает поперечным волнам, а  $i = 3$  – продольной.

Из рис. 1 видно, что добавочные волны (с номерами 2 и 3) имеют существенные действительные части, начиная с частоты  $h\nu_l = 2.5544$  эВ. Мнимые части изображены на рис. 2. Здесь ситуация обратная – для  $\nu < \nu_l$  мнимые части добавочных волн имеют значительные величины.

На рис. 3 изображены спектры отражения для s- и p-поляризации для кристалла CdS.

На рис. 4–6 представлены аналогичные результаты для наноматериала силицена.

Следовательно, в работе показано, что характер проявления пространственной диспер-

сии для полупроводникового кристалла и наноматериала силицена имеют схожий характер, что обусловлено выраженностью эффектов пространственной дисперсии в экситонной области спектра этих материалов. Особенностью обоих спектров являются пички в области частот  $h\nu_l = 2.5544$  эВ для кристалла CdS и  $h\nu_l = 2.34454$  эВ для силицена.

### Список литературы

1. Александров Ю., Яцышен В. Поверхностные поляритоны с отрицательной групповой скоростью в структуре с переходным слоем // Журнал nano- и электронной физики. 2016. Т. 8. № 1. 01013(3).
2. Александров Ю., Яцышен В. Поверхностные поляритоны на границе объемный титан-вакуум // Физика волновых

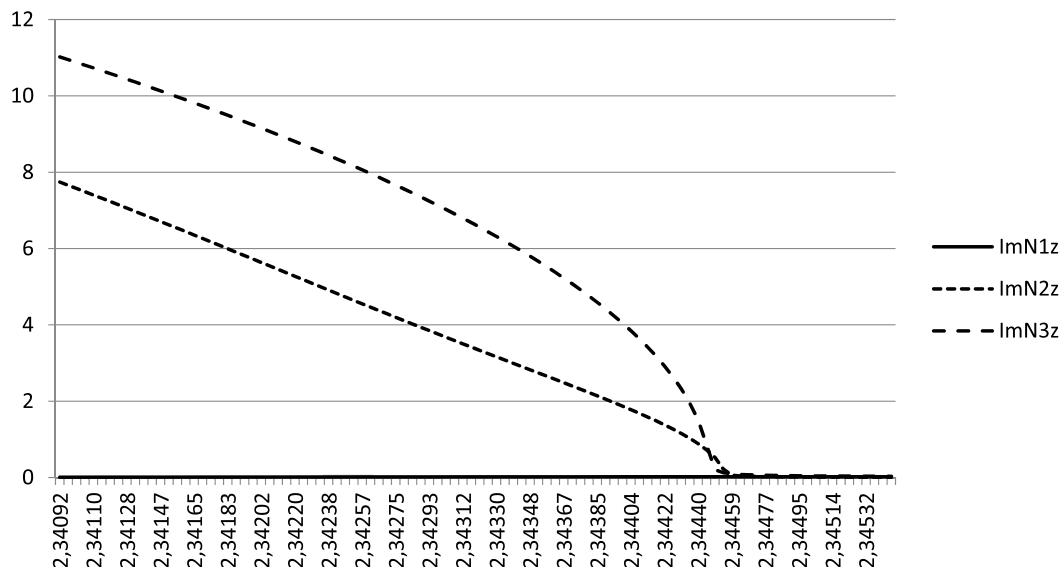


Рис. 5. Зависимость мнимых частей  $N_{iz}$  от частоты в эВ для наноматериала силицена

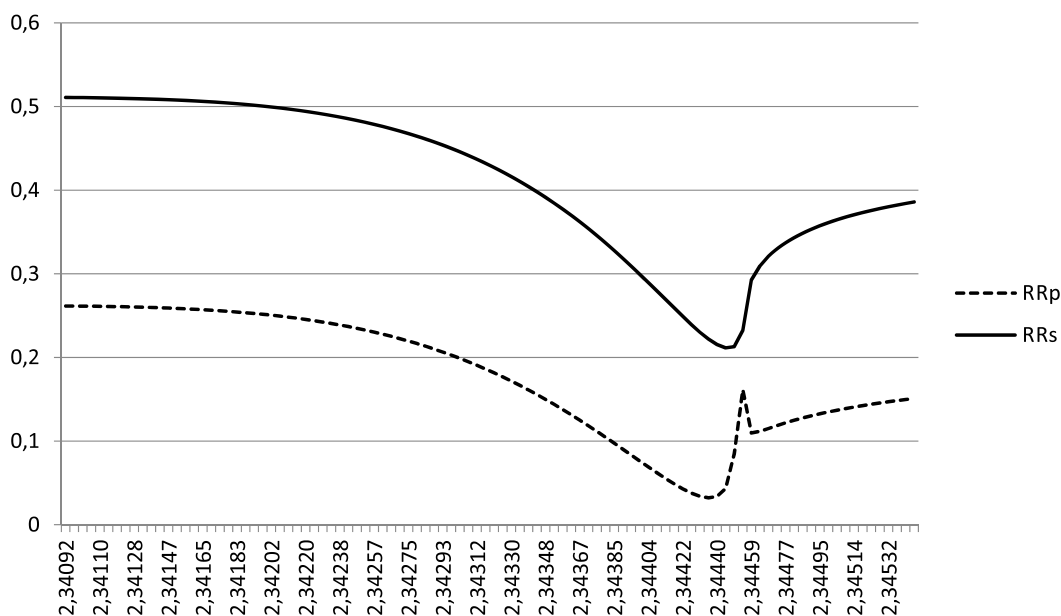


Рис. 6. Спектры отражения для s- и p-поляризации для наноматериала силицена

- процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 4. С. 23–26.
- Александров Ю., Яцышен В. Отрицательная групповая скорость поверхностных поляритонов в металлической пленочной наноструктуре // Журнал нано- и электронной физики. 2017. Т. 9. № 3. 03039(4).
  - Александров Ю., Яцышен В. Компьютерная программа для расчета компонентов тензора комплексной диэлектрической проницаемости с учетом анизотропии и пространственной дисперсии. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016610146, 11 января 2016 г.
  - Александров Ю., Яцышен В. Компьютерная программа для расчета комплексной диэлектрической проницаемости с учетом пространственной дисперсии. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016610396, 11 января 2016 г.

## The effect of spatial dispersion on the optical properties of semiconductors and nanomaterials

*Yu.M. Alexandrov, V.V. Yatsyshen*

The report compares the behavior of the optical parameters of normal waves arising in a medium with spatial dispersion for a semiconductor material – the CdS crystal and the nanomaterial – silicene. It is noted that spatial dispersion should be taken into account when analyzing the reflection spectra near exciton resonance.

**Keywords:** spatial dispersion, optical properties, semiconductor, nanomaterial, normal waves, exciton resonance.