

Исследование поверхностных поляритонов ZnO В СИЛЬНОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Венгер Е.Ф.¹, Евтушенко А.И.², Мельничук Л.Ю.², Мельничук А.В.²

¹Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарёва НАН Украины, Киев, Украина, 03028, Киев 28, проспект Науки, 41

²Нежинский государственный университет имени Николая Гоголя, Украина, 16600, ул. Кропивянского, 2, г. Нежин. E-mail: mov310@mail.ru

С помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследовано влияние сильного однородного магнитного поля на оптические и электрофизические свойства монокристалла ZnO с концентрацией свободных носителей заряда $9,3 \cdot 10^{16} \div 2,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$. Показано, что при данной ориентации в монокристаллах ZnO существуют 3 дисперсионные ветви. Установлена возможность возбуждения «чистой» фоновой дисперсионной ветви в монокристаллах окиси цинка, расположенных в магнитном поле, и определен коэффициент затухания поверхностных поляритонов (ПП).

Ключевые слова: метод нарушенного полного внутреннего отражения, поверхностный поляритон.

Возбуждению поверхностных и объемных фоновых и плазмон-фононных поляритонов в полубесконечных одноосных кристаллах при учете затухания и его отсутствию в литературе посвящено ряд работ [1 – 4]. Актуальным остается вопрос влияния внешних факторов на поверхность твердого тела.

В данной работе исследовано влияние сильного однородного магнитного поля на свойства поверхностных фоновых и плазмон-фононных поляритонов гексагонального монокристалла ZnO при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$ (рис. 1).

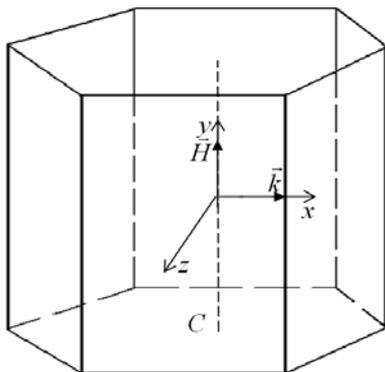


Рис. 1. Взаимное положение векторов \vec{H} , \vec{k} и координатных осей x , y , z в ZnO.

На рис. 2 (кривые 1, 2, 3) представлены теоретические спектры НПВО $R(\nu)$ нелегированной окиси цинка ($n = 9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$)

при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, которые записаны при воздушном зазоре между исследуемым образцом и призмой НПВО $d = 14,6$ (1, 1'); 8,7 (2, 2'); 4,1 (3, 3') мкм и углах 30° (1, 1'), 35° (2, 2'), 50° (3, 3'). Расчет проведен при отсутствии влияния на монокристалл магнитного поля (1 - 3) и при действии последнего величиной 100 кЭ (1' - 3') при ориентации $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$. Точки – экспериментальные данные для образца ZnO ($n = 9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$), зарегистрированные по методике [3]. Величина d варьировалась до установления интенсивности поглощенной волны не превышающей 20 % при неизменной частоте минимума в спектре НПВО [4].

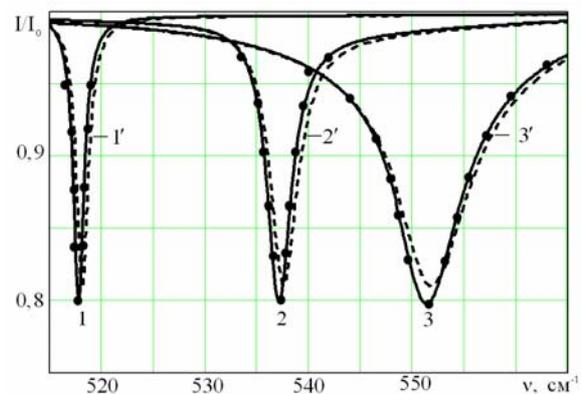


Рис. 2. Спектры НПВО ZnO ($n = 9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$: 1 - 3 - $H = 0$ кЭ; 1' - 3' - $H = 100$ кЭ. Линия – расчет; точки – эксперимент.

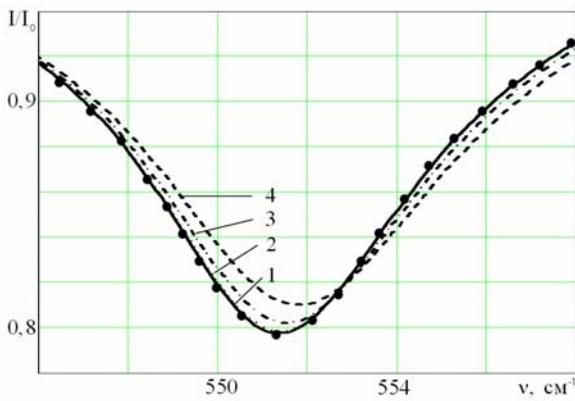


Рис. 3. Спектры НПВО ZnO ($n = 9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$: 1 – $H = 0$ кЭ, 2 – $H = 30$ кЭ, 3 – $H = 65$ кЭ, 4 – $H = 100$ кЭ. Линия – расчет; точки – эксперимент.

Минимумы экспериментальных и расчетных спектров соответствуют частотам $\nu_{\text{мин}} = 518$ (1), 537 (2), 551 (3) см^{-1} без влияния на образец магнитного поля, при $H = 100$ кЭ – $\nu_{\text{мин}} = 518$ (1'), 538 (2'), 552 (3') см^{-1} . Полуширина спектров соответственно составляет $\Gamma_{\text{п}} = 2, 3, 9 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 показаны спектры НПВО для нелегированной окиси цинка с концентрацией свободных носителей заряда $n = 9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и угле падения ИК-излучения в призме НПВО 50° . Толщина зазора между призмой и монокристаллом составляла 4 мкм. Сканирование проводилось по величине магнитного поля соответственно 0 (1), 30 (2), 65 (3) и 100 (4) кЭ. Минимум спектров соответствует частоте $\nu_{\text{мин}} = (551 \pm 1) \text{ см}^{-1}$ для всех значений магнитного поля.

Как видно из рис. 3, магнитное поле влияет на интенсивность коэффициента поглощения в области минимума спектра НПВО и не изменяет частоту последнего в пределах погрешности эксперимента. Аналогичные исследования

проведены для легированных ZnO с концентрацией свободных носителей заряда $6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Обнаружено, что при увеличении степени легирования окиси цинка влияние магнитного поля на характер спектра НПВО становится существеннее.

На рис. 4 показаны дисперсионные кривые слабо легированного монокристалла ZnO ($n = 6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при наличии действия на кристалл однородного магнитного поля величиной от 0 Э до 100 кЭ при ориентации $\vec{H} \perp \vec{k}$. Из рис. 4 (вставка) видно, что высокочастотная дисперсионная кривая практически не изменяется при сканировании магнитного поля от 0 до 100 кЭ, тогда как нижняя дисперсионная ветвь с ростом величины магнитного поля смещается в область меньших частот. Кроме того, наличие действия магнитного поля на монокристалл ZnO в области частот от 190 до 350 см^{-1} приводит к появлению еще одной дисперсионной ветви, ограниченной значением волнового вектора. При росте величины внешнего магнитного поля указанная ветвь смещается в область высоких частот. Это обусловлено тем, что при увеличении величины магнитного поля циклотронная частота смещаются в высокочастотную область, при этом расщепляется связь между плазмонами и фононами и появляется «чистая» фононная дисперсионная ветвь [5]. Аналогичным является влияние магнитного поля на дисперсионные зависимости нелегированного и сильно легированного монокристаллов ZnO. Рассчитаны предельные частоты верхней и нижней ветви дисперсионной кривой, а также предельная частота «чистой» фононной ветви (табл. 1).

Таблица 1. Предельные значения частот ν^\pm и частоты дополнительной дисперсионной ветви монокристалла ZnO, помещенного в магнитном поле

| $H, \text{ Э}$ | 1 | | $30 \cdot 10^3$ | | | $65 \cdot 10^3$ | | | $100 \cdot 10^3$ | | |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $n, \text{ см}^{-3}$ | ν^- , см^{-1} | ν^+ , см^{-1} | ν^- , см^{-1} | ν_f , см^{-1} | ν^+ , см^{-1} | ν^- , см^{-1} | ν_f , см^{-1} | ν^+ , см^{-1} | ν^- , см^{-1} | ν_f , см^{-1} | ν^+ , см^{-1} |
| $9,3 \times 10^{16}$ | 59 | 561 | 34 | 108 | 561 | 21 | 171 | 561 | 14 | 242 | 561 |
| $6,6 \times 10^{17}$ | 152 | 578 | 124 | 201 | 576 | 98 | 245 | 575 | 80 | 293 | 574 |
| $2,0 \times 10^{18}$ | 246 | 627 | 221 | 287 | 620 | 196 | 316 | 612 | 174 | 345 | 607 |

На рис. 5 показаны расчетные дисперсионные кривые ZnO с тремя разными концентрациями свободных носителей зарядов (1 – $9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 – $2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при учете

действия на монокристалл магнитного поля величиной 100 кЭ. Как видно, с ростом концентрации свободных носителей заряда и

под действием магнитного поля при ориентации смещаются в область высоких частот.

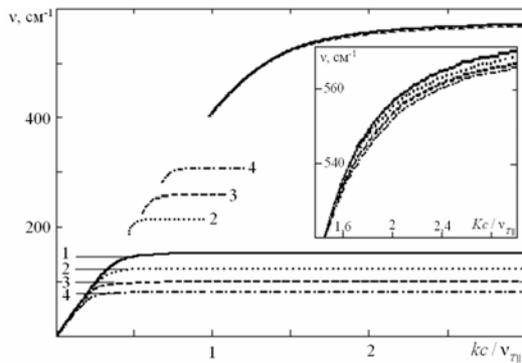


Рис. 4. Дисперсионные зависимости монокристалла ZnO ($n = 6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$ в магнитном поле величиной: 1 – 0 Э; 2 – 30 кЭ; 3 – 65 кЭ; 4 – 100 кЭ.

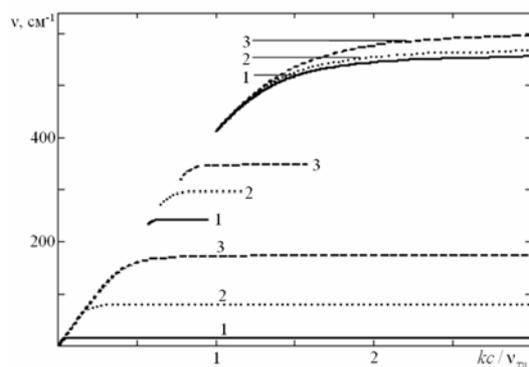


Рис. 5. Высоко- и низкочастотная дисперсионные ветви ZnO при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$, $k_x = k$, $k_{y,z} = 0$ под действием магнитного поля величиной 100 кЭ: 1 – $9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 – $2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 4, 5 представлены расчетные дисперсионные зависимости при учете анизотропии фононной и плазменной подсистем и отсутствии затухания в них. С учетом затухания для магнитоплазмонов и для поверхностных плазмон-фононных мод в магнитном поле зарегистрирован загиб (поворот) назад в расчетных дисперсионных кривых ZnO при данных условиях.

На рис. 6 дана зависимость коэффициента затухания ПП от частоты $\Gamma_{\text{ПП}}(\nu)$ для монокристалла ZnO. Кривые 1 – 3 рассчитаны по

$C \parallel y$ и $\vec{H} \perp \vec{k}$ все три дисперсионные ветви формуле [3] для монокристаллов окиси цинка с разной степенью легирования (1 – $9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 – $2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и отсутствии действия на кристалл магнитного поля. Кривые 1'–3' – для сильно легированного образца ZnO ($2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$ в случае действия магнитного поля на монокристалл в направлении $\vec{H} \perp \vec{k}$, $\vec{H} \parallel y$ и величиной 30 (1'), 65 (2'), 100 (3') кЭ.

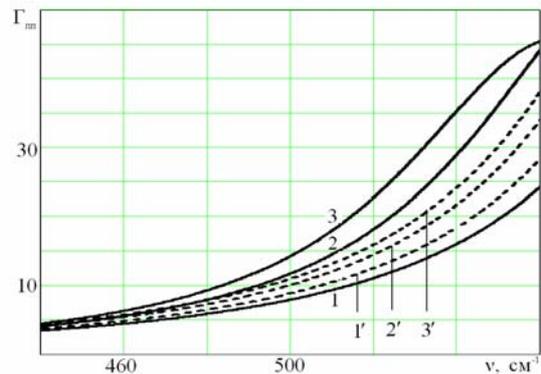


Рис. 6. Зависимость коэффициента затухания поверхностных поляритонов от частоты $\Gamma_{\text{ПП}}(\nu)$ для монокристалла ZnO: 1 – $9,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $6,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3, 1'–3' – $2,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 1 – 3 – $H = 0$ Э, 1' – 3' – $H = 30, 65, 100$ кЭ.

В работе [6] графическим способом определен коэффициент затухания ПП. На рис. 7 показана методика определения коэффициента затухания ПП $\Gamma_{\text{ПП}}$ для оптически-анизотропных монокристаллов ZnO. Кривая 1 – дисперсионная ветвь, а штриховые 2, 3 определяют полуширину $\Gamma_{\text{П}}$ в спектре НПВО. «Истинная» ширина спектров, согласно [6], равняется коэффициенту затухания ПП и определяется разницей частот, расположенных на пересечении перпендикулярной прямой к оси абсцисс в системе штриховые кривые – дисперсионная точка. Рассчитанные таким методом значения $\Gamma_{\text{П}}$ даны в табл. 2.

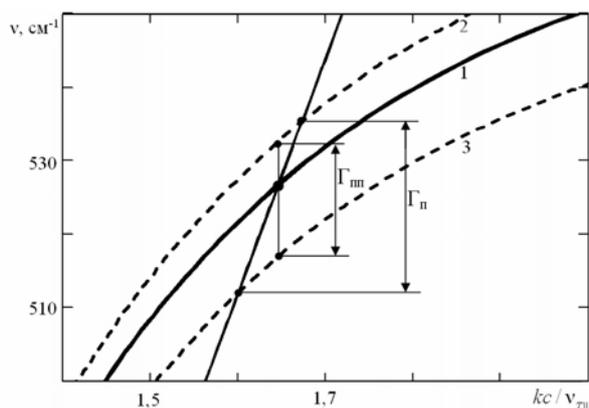


Рис. 7. Дисперсионная зависимость ZnO. Γ_n и $\Gamma_{ПП}$ – полуширина и коэффициент затухания ПП.

Как видно с табл. 2, при увеличении угла падения и росте концентрации свободных носителей заряда в монокристаллах ZnO коэффициент затухания ПП растет. Аналогичным является влияние плазмон-фононного затухания и внешнего магнитного поля на Γ_n и $\Gamma_{ПП}$ ZnO.

Таблица 2. Полуширина минимумов в спектре НПВО (Γ_n) и коэффициент затухания ПП ($\Gamma_{ПП}$) ZnO при $\gamma_p \neq 0$, $\gamma_f \neq 0$ и $H = 0$, $H = 100$ кЭ

| $\varphi, ^\circ$ | $H = 0$ кЭ | | | | $H = 100$ кЭ | | | |
|--|------------------------------|--------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------|----------------------------|-------------------------------|
| | $\nu_{\min}, \text{cm}^{-1}$ | χ | Γ_n, cm^{-1} | $\Gamma_{ПП}, \text{cm}^{-1}$ | $\nu_{\min}, \text{cm}^{-1}$ | χ | Γ_n, cm^{-1} | $\Gamma_{ПП}, \text{cm}^{-1}$ |
| ZO1-3 ($\gamma_{p\perp} = 280$, $\gamma_{p\parallel} = 260$, $\gamma_{f\perp,\parallel} = 13$) | | | | | | | | |
| 30 | 527 | 1,67 | 23,73 | 17,11 | 528 | 1,7 | 35,69 | 27,52 |
| 35 | 550 | 2,06 | 132,29 | 111,68 | 551 | 2,17 | 270,52 | 216,5 |
| 50 | 563 | 2,7 | — | — | 564 | — | — | — |
| ZO2-3 ($\gamma_{p\perp} = 150$, $\gamma_{p\parallel} = 170$, $\gamma_{f\perp,\parallel} = 11$) | | | | | | | | |
| 30 | 518 | 1,63 | 10,59 | 7,04 | 518 | 1,632 | 11,13 | 7,12 |
| 35 | 537 | 1,945 | 24,93 | 21,86 | 538 | 1,985 | 35,22 | 31,23 |
| 50 | 551 | 2,63 | 209,67 | 197,41 | 552 | 2,805 | 353,45 | 328,61 |
| ZO6-B ($\gamma_{p\perp} = 406$, $\gamma_{p\parallel} = 350$, $\gamma_{f\perp,\parallel} = 21$) | | | | | | | | |
| 30 | 555 | 1,86 | — | 197,25 | 557 | 1,94 | — | 410,19 |
| 35 | 576 | 2,26 | — | — | 574 | 2,38 | 741,25 | 720,1 |
| 50 | 585 | — | — | — | 582 | 2,85 | 872,47 | 853,34 |

5. Выводы

Таким образом, действие сильного однородного магнитного поля на монокристалл ZnO при ориентации $C \parallel y$, $\vec{k} \perp C$, $xy \parallel C$, $\vec{H} \perp \vec{k}$ сопровождается изменениями коэффициента поглощения в спектрах НПВО, а именно изменением частоты минимума и интенсивности. Впервые показано, что в оптически-анизотропных монокристаллах ZnO возможно возбуждение «чистой» фононной дисперсионной ветви, которая с ростом величины внешнего магнитного поля смещается в высокочастотную область спектра. Начальная частота и характер «чистой» фононной дисперсионной ветви зависит от концентрации свободных носителей заряда и величины магнитного поля. При действии магнитного поля на оптически-анизотропный монокристалл нижняя дисперсионная ветвь деформируется. В то же время высокочастотная ветвь

дисперсионной кривой в пределах погрешности эксперимента остается неизменной. Что касается коэффициента затухания ПП ZnO, то этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях, однако неопровержимым является влияние внешнего магнитного поля.

Литература

- [1] Санников Д.Г., Жирнов С.В., Семенцов Д.И., «Магнитные поляритоны на границе сверхпроводника и ферромагнетика», ФТТ, т. 57, вып. 9, с. 1824 – 1828, 2009.
- [2] Альшиц В.И., Любимов В.Н., «Бездисперсионные поверхностные поляритоны на различных срезах оптически одноосных кристаллов», ФТТ, т. 44, вып. 2, с. 371 – 374, 2002.
- [3] Венгер С.Ф., Мельничук О.В., Пасічник Ю.А., «Спектроскопія залишкових променів», К.: Наука, 192 с, 2001.

[4] Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л., “Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках”, К.: Наук. думка, 375 с, 1989.

[5] “Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред”, под ред В.М. Агроновича, Д.Л. Миллса, М.: Наука, 528 с, 1985.

[6] Решина И.И., Мирлин Д.Н., Банщиков А.Г., “Определение параметров ангармонизма и оптических постоянных кристаллов по спектрам поверхностных поляритонов”, ФТТ, т.15, вып. 2, с. 506 – 51, 1976.