

01;06;07;12

## Поверхностные плазмон-фононные поляритоны гексагональной окиси цинка

© А.В. Мельничук, Л.Ю. Мельничук, Ю.А. Пасечник

Украинский государственный педагогический университет,  
252030 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 21 мая 1996 г.)

Исследована анизотропия поверхностных плазмон-фононных поляритонов первого и второго типов гексагональной окиси цинка при разных концентрациях электронов и ориентациях оси  $C$  кристалла относительно его поверхности. Показано, что при концентрации электронов больше  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в ZnO при  $K \perp C$  и  $xy \perp C$  генерируются поверхностные плазмон-фононные поляритоны третьего типа. Рассчитан спектр ППФП 3-го типа и определены условия существования поверхностных плазмон-фононных поляритонов третьего типа в монокристаллах ZnO.

Взаимодействие электромагнитных волн с колебаниями решеток пленки и подложки изменяет пространственную структуру полей, области существования и дисперсионные зависимости различных поверхностных возбуждений твердотельной системы [1,2]. Впервые поверхностные плазмон-фононные поляритоны сильно легированных анизотропных полупроводников исследованы в работе [3]. Поверхностные плазмон-поляритоны в одноосном полупроводнике имеют дисперсионные зависимости, число которых зависит от концентрации носителей зарядов и от ориентации оптической оси кристалла  $C$  относительно его поверхности  $xy$ . Экспериментальные дисперсионные зависимости поверхностных плазмон-фононных поляритонов в сильно легированном гексагональном карбиде кремния (SiC 6H) получены в работе [4]. Однако их различия определяются преимущественно анизотропией эффективной массы электронов в SiC 6H. В данной работе решалась задача исследования анизотропии поверхностных плазмон-фононных поляритонов гексагонального монокристалла окиси цинка при разных ориентациях оси  $C$  кристалла относительно его поверхности. При расчетах использованы взаимно согласованные параметры модели ZnO, полученные в работе [5].

Окись цинка кристаллизуется в структуре вюртцита с пространственной группой  $C_{6v}^4(P6_3mc)$  [6]. Экспериментальные спектры модифицированного нарушенного полного внутреннего отражения поляритонов ZnO получены при помощи спектрометра ИКС-29М и приставки НПВО-2. В качестве элемента нарушенного полного внутреннего отражения выбран полуцилиндр из KRS-5 с показателем преломления  $n = 2.38$ . Размер монокристаллов ZnO ( $10 \times 8 \times 8 \text{ мм}$ ) позволил получить спектры в поляризованном излучении при различных ориентациях оси  $C$  относительно поверхности  $xy$ .

На рис. 1 (точки) показаны три экспериментальные дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  образца ZO2-3, соответствующие высокочастотным ветвям  $\nu^+$  поляритонов [3]. Кривая 1 получена при ориентации  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$ . Безразмерный волновой вектор  $q = Kc/\omega_{\text{т||}}$ , где  $K$  —

волновой вектор ППФП,  $c$  — скорость света,  $\omega_{\text{т||}}$  — циклическая частота поперечного оптического фонона при  $E \parallel C$ ,  $E$  — электрический вектор инфракрасного излучения. Кривая 2 соответствует  $\nu_s(K)$  при  $K \perp C$  и  $xy \perp C$ , а кривая 3 — ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \parallel C$ .

На рис. 2 представлены экспериментальные спектры образца ZO2-3 при ориентации  $K \parallel C$  и  $xy \parallel C$  монокристалла ZnO. Спектры записаны при воздушном зазоре между элементом отражения и образцом толщиной  $d = 26$  (кривые 1, 2) и 3 мкм (кривые 3–5) при углах падения ИК излучения  $\alpha$  в элементе нарушенного полного внутреннего отражения, указанных в подписях к рисунку. Минимумы спектров соответствуют частотам  $\nu_{\text{min}} = 408, 450, 496, 518$  и  $527 \text{ см}^{-1}$ , при этом ширина спектров  $\Gamma_s = 32, 27, 22, 17$  и  $15 \text{ см}^{-1}$ . Кривая 8 рассчитана при использовании данных образца ZC1M (концентрация электронов  $n_0 = 4.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) для поляритонов 3-го типа.

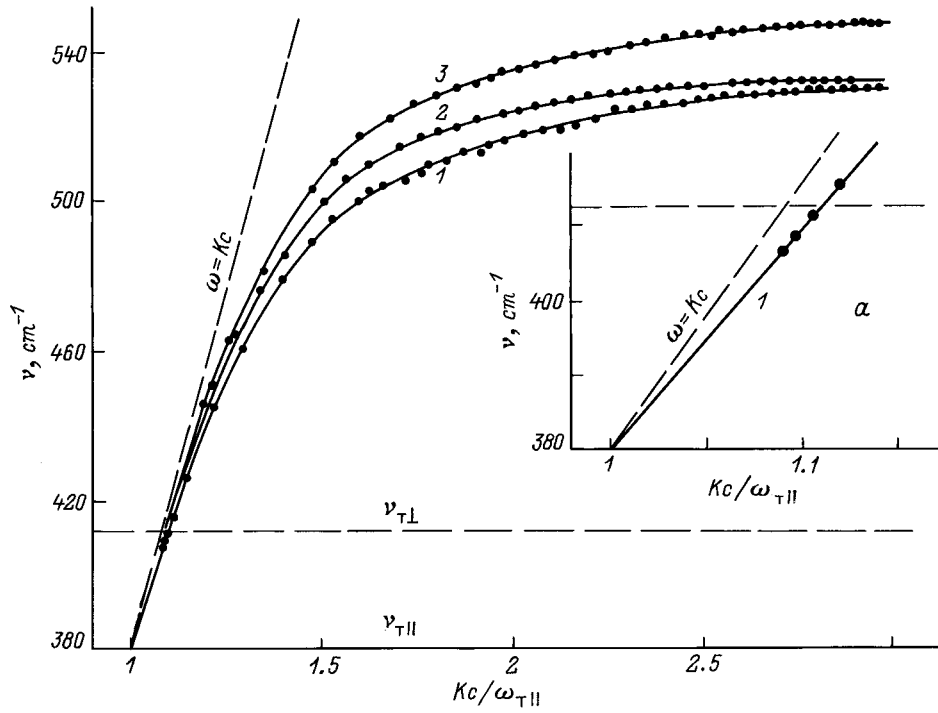
Зависимости  $\nu_s(K)$  (рис. 1, сплошные кривые) получены при помощи выражения

$$K_x^2 = [\varepsilon_{\parallel}(\nu) - \varepsilon_{\perp}(\nu)\varepsilon_{\parallel}(\nu)]/[1 - \varepsilon_{\perp}(\nu)\varepsilon_{\parallel}(\nu)], \quad (1)$$

где  $K_x = Kc/\omega$ ,  $\omega$  — циклическая частота,  $\nu$  — частота излучения,  $\varepsilon_{\perp}(\nu)$  и  $\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  — диэлектрические функции ZnO перпендикулярно и параллельно оси  $C$ .

Уравнение (1) записано для ориентации  $K \perp C$  и  $xy \perp C$  (кривая 2). Если  $\varepsilon_{\perp}(\nu)$  и  $\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  поменять местами, то при помощи (1) можно получить  $\nu_s(K)$  (кривая 1). Зависимости 1, 2 на рис. 1 соответствуют необыкновенным поверхностным поляритонам. Обыкновенные проявляются при ориентации  $K \perp C$  и  $xy \parallel C$ , выражение (1) преобразуется при замене  $\varepsilon_{\perp}(\nu)$  на  $\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  (кривая 3).

Согласие расчета с экспериментальными данными достигнуто при использовании в расчете оптических параметров ZnO, полученных на основе дисперсионного анализа спектров отражения ZO2-3 при концентрации электронов  $n_0 = 9.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и учете анизотропии их эффективной массы в ZnO [5]. Частоты плазмон-фононных колебаний (кривые 2, 3) соответственно  $548$  и  $560 \text{ см}^{-1}$



**Рис. 1.** Дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  ППФП ZnO (образец ZO2-3,  $n_0 = 9.3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . 1 —  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$ ; 2 —  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ ; 3 —  $K \perp C$ ,  $xy \parallel C$ ; a —  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$ ).

при частотах плазменного резонанса  $\nu_{p\perp} = 90 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{p\parallel} = 100 \text{ cm}^{-1}$  ( $E \perp C$ ,  $E \parallel C$ ).

Уравнение (1) позволяет получить аналогично изотропному случаю две дисперсионные ветви. Высокочастотная ветвь  $\nu^+$  начинается в точке  $\nu = \nu_{\perp\perp}$  и при  $K \gg \omega/c$  частота  $\nu_s$  асимптотически приближается к значению, соответствующему решению дисперсионного уравнения в отсутствии учета запаздывания  $\epsilon_{\perp} = -1$ ,

$$\nu_{\pm} = (1/2)^{1/2} \{ \epsilon_{\perp\perp}^2 + \xi_{p\perp}^2 \pm [(\xi_{\perp\perp}^2 + \xi_{p\perp}^2)^2 - 4\xi_{p\perp}^2 \xi_{\perp\perp}^2]^{1/2} \}^{1/2},$$

$$\xi_{\perp\perp}^2 = [(1 + \epsilon_{0\perp}) / (1 + \epsilon_{00\perp})] \nu_{\perp\perp}^2, \\ \xi_{p\perp}^2 = \epsilon_{00\perp} \nu_{p\perp}^2 / (1 + \epsilon_{00\perp}). \quad (2)$$

Низкочастотная ветвь  $\nu^-$  существует при всех значениях  $K$ . Исследуемые поляритоны проявляются при двух условиях:

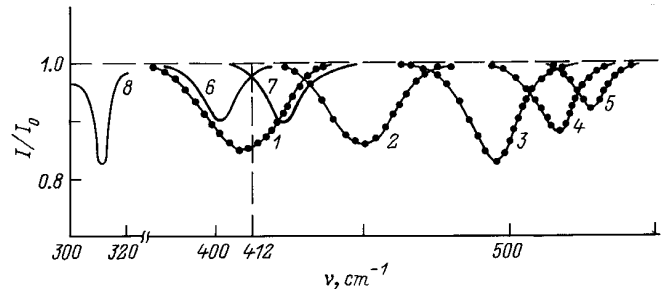
$$1) \epsilon_{\perp} < 0, \quad \epsilon_{\parallel} < 0; \quad 2) \epsilon_{\perp} < 0, \quad \epsilon_{\parallel} > K_x^2. \quad (3)$$

В отличие от изотропного случая при  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$  в ZnO появляются новые ветви, число и области существования которых зависят от концентрации электронов в зоне проводимости и от относительного расположения частот  $\nu_{\perp\perp\parallel}$ ;  $\nu_{L\perp\parallel}$ ;  $\nu_{p\perp\parallel}$ ;  $\nu_{\perp\parallel}^{+,-}$ ;  $\Omega_{\perp\parallel}^{+,-}$ . Последние 8 величин определяются соотношениями [3]

$$\epsilon_{\perp}(\nu_{\perp\parallel}^{+,-}) = 0, \quad \epsilon_{\parallel}(\nu_{\perp\parallel}^{+,-}) = 0, \\ \epsilon_{\perp}(\Omega_{\perp\parallel}^{+,-}) = 1, \quad \epsilon_{\parallel}(\Omega_{\perp\parallel}^{+,-}) = 1,$$

$$\nu_{\perp\parallel}^{+,-} = (1/2)^{1/2} \{ (\nu_{L\perp\parallel})^2 + (\nu_{p\perp\parallel})^2 \pm [(\nu_{L\perp\parallel})^2 + (\nu_{p\perp\parallel})^2 - 4(\nu_{p\perp\parallel})(\nu_{\perp\perp\parallel})^2]^{1/2} \}^{1/2}. \quad (4)$$

При этом максимальное число ветвей может быть 4. При  $K \gg \omega/c$  их частоты асимптотически приближаются к граничным частотам, соответствующим решениям уравнения  $\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel} = 1$ . Поверхностным поляритонам отвечают лишь те участки кривых, которые лежат в областях плоскости  $(\nu, K)$ , где выполняются условия (3).  $\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel} = 1$  — уравнение четвертого порядка относительно  $\nu^2$ , но лишь одно, два или три решения лежат в областях,



**Рис. 2.** Спектры НПВО ZnO (ZO2-3,  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$ ). 1, 2 —  $d = 26$ , 3-5 —  $3 \mu\text{m}$ ; 1-5 —  $\alpha = 25.3, 28, 34, 42, 52^\circ$  соответственно;  $\Gamma_s = 32, 27, 22, 17, 15 \text{ cm}^{-1}$ , 6, 7 — расчет:  $d = 72$  и  $49 \mu\text{m}$ ,  $\gamma_{ph} = 11 \text{ cm}^{-1}$ ;  $\alpha_6 = 25.2^\circ$ ;  $\alpha_7 = 25.7^\circ$ ;  $\nu_6 = 401 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_7 = 423 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Gamma_{s6,7} = 12 \text{ cm}^{-1}$ ; 8 — расчет для образца ZC1M:  $\gamma_{ph} = 6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\gamma_{p\perp} = \gamma_{p\parallel} = 1 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\alpha = 28^\circ$ ,  $d = 26 \mu\text{m}$ .

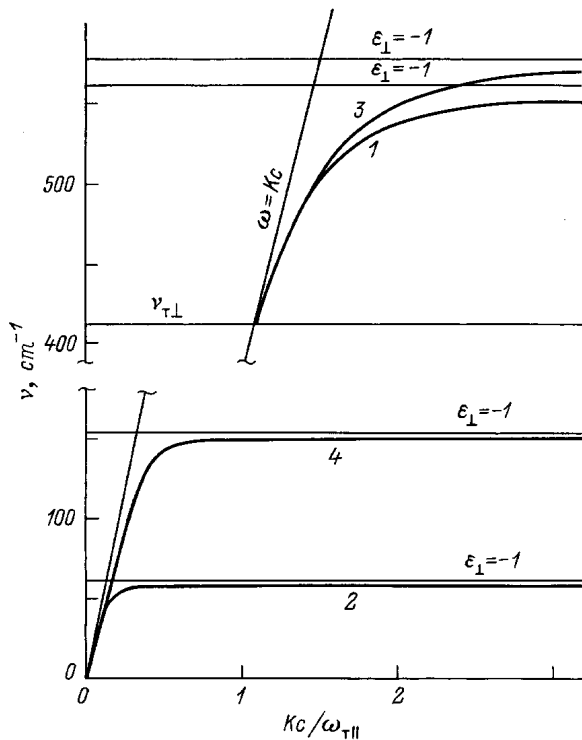


Рис. 3.  $\nu_s(K)$  ППФП ZnO при  $K \perp C$  и  $K \parallel C$ .

где  $\varepsilon_{\perp} < 0$ , т.е. они ограничены конечными значениями  $K$ .

В изотропном случае для обыкновенного поляритона существует одна низкочастотная ветвь  $\nu^-$ , которая начинается при  $\nu = 0$  и возрастает до  $\nu^-$  при  $K \rightarrow \infty$ . Поверхностные поляритоны имеют две ветви дисперсионных зависимостей  $\nu_s^{\pm}(K)$ . На рис. 3 показаны  $\nu_s(K)$  ZnO при ориентации  $K \parallel C$  и  $K \perp C$ . При данной ориентации проявляются обыкновенные поляритоны. Расчеты дисперсионных зависимостей проведены применительно к образцам ZO2-3 (кривые 1, 2) и ZO1-3 (кривые 3, 4). Кривые 1, 2 получены при  $\nu_{p\perp} = 90 \text{ cm}^{-1}$ , а 3, 4 — при  $\nu_{p\perp} = 240 \text{ cm}^{-1}$ . Соответственно  $\nu_{pf}^+ = 561 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{pf}^- = 59 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{pf}^+ = 578 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{pf}^- = 152 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{T||} \rightarrow \infty$ . Индекс (pf) применяется для граничных значений, соответствующих значениям  $\nu^{\pm}$ , которые получены согласно (2). Расчеты показывают, что частоты поляритонов тем выше, чем больше концентрация свободных носителей зарядов (электронов для ZnO). Кривые 1–4 соответствуют поляритонам 1-го типа, которые существуют при любых  $K_x^2 > 1$  [7].

Для ZnO  $\nu_{T||} < \nu_{T\perp} < \nu_{L||} < \nu_{L\perp}$  дисперсионные кривые  $\nu_s(K)$  начинаются с частот на световой линии  $\omega = Kc$ .

$$\begin{aligned} \nu &= 0; \quad \nu = \nu_{T\perp} (\varepsilon_{\perp} = 00) \quad \text{и} \\ \nu &= \Omega_{||}^+, \quad \nu = \Omega_{||}^- (\varepsilon_{||} = 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Для монокристаллов окиси цинка невыполнение условия  $\Omega_{||}^+ < \nu < \nu_{T\perp}^+$  приводит к наличию только

трех дисперсионных ветвей  $\nu_s(K)$ . На рис. 4 показаны  $\nu_s(K)$  образца ZC1M, у которого  $\nu_{p\perp} = 605 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{p||} = 650 \text{ cm}^{-1}$ . Расчет показывает наличие трех дисперсионных зависимостей (кривые 1–3).  $\nu_{pf}^+ = 719 \text{ cm}^{-1}$  (кривая 1),  $\nu_{pf}^- = 305 \text{ cm}^{-1}$  (кривая 2). Кривая 3 начинается на частоте  $\Omega_{||}^- = 309.9 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{T||} = 0.815$  и заканчивается на частоте  $\nu_{T\perp}^- = 318.4 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{T||} = 1.632$ . Кривая 3 в увеличенном масштабе представлена на рис. 5, а.

На рис. 5 показаны дисперсионные зависимости поверхностных поляритонов ZnO при  $\nu_{p\perp} = 1300 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{p||} = 1430 \text{ cm}^{-1}$ . В этом случае  $\nu_{pf}^+ = 1273.7 \text{ cm}^{-1}$ , а  $\nu_{pf}^- = 363.6 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{T||} \rightarrow \infty$ . При этом  $\nu_s(K)$  (кривая 3) начинается на частоте  $363.8 \text{ cm}^{-1}$  и при  $Kc/\omega_{T||} \rightarrow \infty$  стремится к значению  $\nu_3 = 390 \text{ cm}^{-1}$ . Расчет  $\nu_s(K)$  для ZnO с  $\nu_{p\perp} = 1500 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{p||} = 1650 \text{ cm}^{-1}$  позволяет оценить  $\nu_{pf}^+ = 1450 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{pf}^- = 367.7 \text{ cm}^{-1}$ . Граничная частота третьей дисперсионной зависимости  $\nu_3 = 395.5 \text{ cm}^{-1}$ . Третья ветвь  $\nu_s(K)$  ZnO отличается от  $\nu_s(K)$ , исследованных ранее в анизотропных кристаллах. При использовании данных образца Zc1M (рис. 4) рассчитан спектр 3-го типа (рис. 2, кривая 8). Спектр получен при  $\gamma_{ph\perp} = \gamma_{ph||} = 6 \text{ cm}^{-1}$  и  $\gamma_{p\perp} = \gamma_{p||} = 1 \text{ cm}^{-1}$  при угле  $\alpha = 28^\circ$  и ширине зазора  $d = 26 \mu\text{m}$ . Минимум спектра 3-го типа на частоте  $\nu_3 = 312.5 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{T||} = 0.92$ .

Анизотропия поляритонов проявляется при  $Kc/\omega_{T||} > 1.2$ . Так, при  $Kc/\omega_{T||} = 2\delta\nu_s = 18 \text{ cm}^{-1}$  (кривые 1, 3). При  $K \rightarrow \infty$  кривые 1, 2 стремятся к  $548 \text{ cm}^{-1}$ . На рис. 1, а в увеличенном масштабе

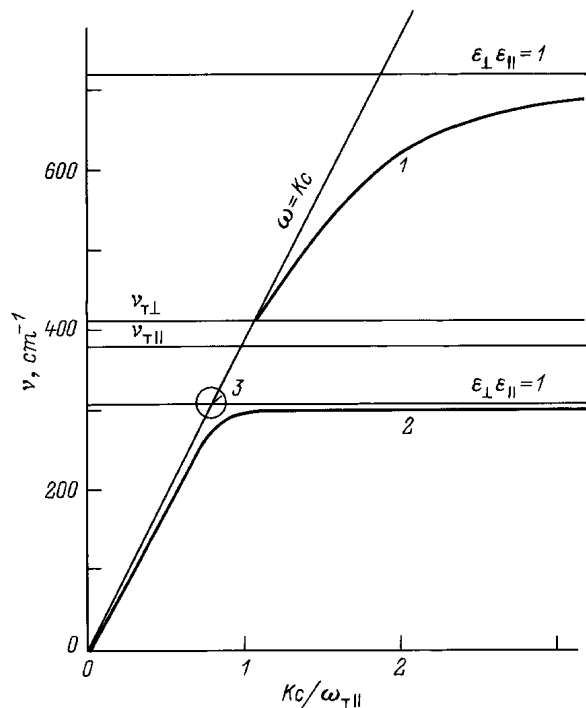
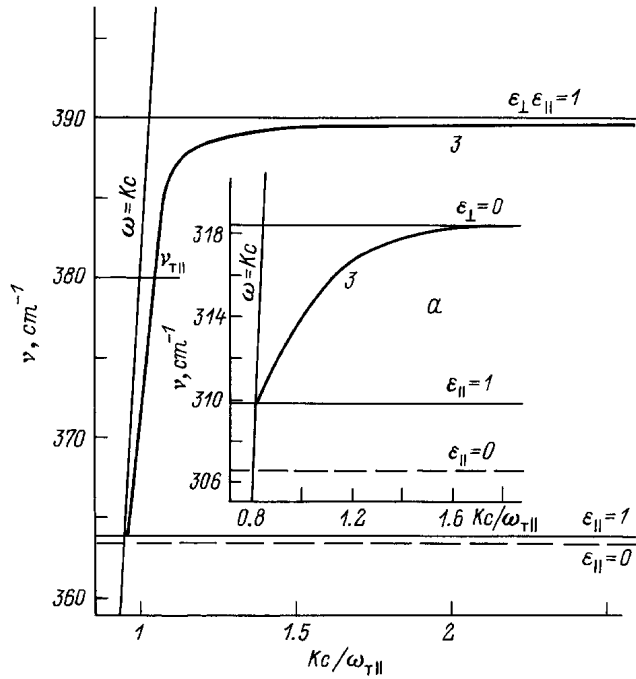


Рис. 4.  $\nu_s(K)$  ППФП ZnO,  $K \perp C$ ,  $K \parallel C$ .



**Рис. 5.**  $\nu_s(K)$  ППФП ZnO  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ . 1 —  $\nu_{pf}^+ = 1273.7 \text{ cm}^{-1}$ , 2 —  $\nu_{pf}^- = 363.5 \text{ cm}^{-1}$ , 3 —  $\nu_3 = 390 \text{ cm}^{-1}$ ;  $\Omega_{||} = 363.8 \text{ cm}^{-1}$ ;  $\nu_{||}^- = 363.6 \text{ cm}^{-1}$ ; а —  $\nu_s(K)$  ППФП ZnO при  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ ;  $\nu_{p\perp} = 605 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{p||} = 650 \text{ cm}^{-1}$  (образец ZC1M),  $\nu_{\perp}^- = 318.4 \text{ cm}^{-1}$ ;  $Kc/\omega_{T||} = 1.632$  ( $\epsilon_{\perp} = 0$ ),  $\Omega_{||}^- = 309.9 \text{ cm}^{-1}$ ;  $Kc/\omega_{T||} = 0.815$  ( $\epsilon_{||} = 1$ ),  $\nu_{||}^- = 306.5 \text{ cm}^{-1}$ ;  $Kc/\omega_{T||} = 0.017$  ( $\epsilon_{||} = 0$ ).

показана часть  $\nu_s(K)$  в области частот 380–420  $\text{cm}^{-1}$ . В этом диапазоне до 412  $\text{cm}^{-1}$  проявляются ППФП 2-го типа, существование которых ограничено условиями  $\epsilon_x(\nu) < 0$  и  $\epsilon_z(\nu) > K_x^2$  [7]. Точками показаны экспериментальные данные для частот  $\nu_s$  ППФП 2-го типа, которые согласуются с расчетом;  $\nu_s(K)$  поляритонов 1-го типа ( $\epsilon_x(\nu) < 0$  и  $\epsilon_z(\nu) < 0$ ) начинаются с частоты 412  $\text{cm}^{-1}$ , экспериментальная зависимость  $\nu_s(K)$  (кривая 1) непрерывна. Мы смоделировали на ЭВМ спектры поляритонов 1-го и 2-го типов в точках, близких к частоте 412  $\text{cm}^{-1}$  ("точка остановки") [8]. Расчет спектров проведен для ориентации  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$  на частотах  $\nu_{sp2} = 411 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_{sp1} = 413 \text{ cm}^{-1}$  при величине зазора  $d = 72$  и  $49 \mu\text{m}$  при коэффициенте затухания поперечных оптических фононов  $\gamma_{ph} = 11 \text{ cm}^{-1}$  [5]. Значения  $K_{sp2} = Kc/\omega_{T||} = 1.10415$  и  $K_{sp1} = Kc/\omega_{T||} = 1.11054$ . Оба спектра имеют одинаковую интенсивность в минимуме одинаковую его ширину  $\Gamma_p = 12 \text{ cm}^{-1}$ . Спектры практически перекрываются, что свидетельствует о том, что при частоте излучения 412  $\text{cm}^{-1}$  при наличии затухания генерируются одновременно поверхностные поляритоны 1-го и 2-го типов.

Экспериментальный спектр с минимумом на частоте 408  $\text{cm}^{-1}$  имеет  $\Gamma_p = 32 \text{ cm}^{-1}$ , что соответствует коэффициенту затухания ППФП  $\Gamma_{sp} = 4 \text{ cm}^{-1}$ . Граничные частоты определяются при помощи выражения (2). Кривая 2 на рис. 1 соответствует  $\nu_s(K)$  ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ . Она начинается на частоте 412  $\text{cm}^{-1}$  и при  $Kc/\omega_{T||} \rightarrow \infty$  стремится к частоте  $\nu_{pf}^+ = 548 \text{ cm}^{-1}$ . Поляритоны 2-го типа могут проявляться лишь при  $\epsilon_{\perp} < 0$  и  $\epsilon_{||} > K_x^2$  (3). В случае ZnO диапазон существования поляритонов 2-го типа ограничен частотами 380–412  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 1, а). Они проявляются при ориентации образца  $K \parallel C$  и  $xy \parallel C$ .

Дисперсионные кривые  $\nu_s(K)$  начинаются на частотах  $\nu = 0$ ,  $\nu = \nu_{T\perp}$  ( $\epsilon_{\perp} = \infty$ ) и  $\nu = \Omega_{||}^+$ ,  $\nu = \Omega_{||}^-$  ( $\epsilon_{||} = 1$ ), совпадающих с прямой  $\omega = Kc$ . Особый интерес представляют дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  поляритонов 3-го типа, проявляющиеся лишь в анизотропных кристаллах при концентрациях носителей зарядов выше определенной граничной. Область существования  $\nu_s(K)$  поляритонов 3-го типа ограничена прямой  $\epsilon_{||} = 1$ , а также прямыми  $\omega = Kc$  и  $\epsilon_{\perp} = 0$ . Если  $\nu_{\perp}^- > \nu_{T||}$ , то  $\nu_s(K)$  существует при всех  $K > \Omega_{||}^-/c$ . Так как  $\Omega_{||}^- \geq 301.1 \text{ cm}^{-1}$ , то поляритоны 3-го типа начинают проявляться при  $\nu_{p\perp} \geq 550 \text{ cm}^{-1}$ . Условия существования поляритонов 3-го типа ZnO  $550 \text{ cm}^{-1} \leq \nu_{p\perp} < 1077.3 \text{ cm}^{-1}$ . На рис. 4 показана  $\nu_s(K)$  поляритонов 3-го типа (образец ZC1M) при  $\nu_{p\perp} = 605 \text{ cm}^{-1}$ . В этом случае  $\nu_{||}^- = 306.5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $Kc/\omega_{T||} = 0.017$  ( $\epsilon_{||} = 0$ ),  $\Omega_{||}^- = 309.9 \text{ cm}^{-1}$ ,  $Kc/\omega_{T||} = 0.815$  ( $\epsilon_{||} = 1$ ),  $\nu_{||}^- = 318.4 \text{ cm}^{-1}$ ,  $Kc/\omega_{T||} = 1.632$  ( $\epsilon_{\perp} = 0$ ).

Поляритоны 3-го типа образца ZC1M существуют в диапазоне частот 306.5–318.4  $\text{cm}^{-1}$ . Дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  на рис. 5 получены для ZnO при  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$  и  $\nu_0 > \nu_1$  ( $\nu_{\perp}^- > \nu_{T||}$ ), когда граничная частота  $\nu_3 = 390 \text{ cm}^{-1}$ . При  $\nu_{\perp}^- > \nu_{T||}$  поляритоны существуют на частотах от  $\Omega_{||}^-$  до  $\nu_{T||}$  аналогичный поляритонам 2-го типа, а в диапазоне от  $\nu_{T||}$  до  $\nu_{\perp}^-$  проявляются поляритоны 1-го типа. Низкочастотные  $\nu_s^-(K)$  поляритонов начинаются на частотах  $\nu > 0$ , когда  $K_x^2 > 1$ . При увеличении концентрации носителей зарядов  $\nu_s(K)$  изменяется от 0.54 до 9.5  $\text{cm}^{-1}$ .

Таким образом, в работе проведены исследования поверхностных плазмон-фононных поляритонов первого и второго типов в легированных анизотропных монокристаллах окиси цинка при разных ориентациях волнового вектора относительно поверхности и оптической оси кристалла. Показано, что при повышении концентрации электронов больше  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  в ZnO при  $K \perp C$  и  $xy \perp C$  формируется новая дисперсионная зависимость поляритонов 3-го типа. Определены условия существования поляритонов нового типа. Рассчитаны их дисперсионные зависимости и спектр.

## Список литературы

- [1] Венгер Е.Ф., Пасечник Ю.А., Снитко О.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 18. С. 1128–1131.
- [2] Бурита И.Й., Пасечник Ю.А., Снитко О.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 423–429.
- [3] Гуревич Л.Э., Тарханян Р.Г. // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 7. С. 1944–1949.
- [4] Пасечник Ю.А., Венгер Е.Ф. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1982. Вып. 8. С. 63–71.
- [5] Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 9. С. 2624–2633.
- [6] Кузьмина И.П., Никитенко В.А. Окись цинка. Получение и оптические свойства. М.: Наука, 1984. 166 с.
- [7] Брыксин В.В., Мирлин Д.Н., Решина И.И. Поверхностные колебания в анизотропных кристаллах // ФТТ. 1973. Т. 15. Вып. 4. С. 1118–1123.
- [8] Falge H.J., Otto A. // Phys. St. Sol. (b). 1973. Vol. 56. N 2. P. 523–534.