

## Влияние анизотропии на дисперсию поверхностных плазмон-фононных поляритонов карбида кремния

© А.В. Мельничук, Ю.А. Пасечник\*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина

\* Национальный педагогический университет,  
252030 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 12 сентября 1997 г.  
В окончательной редакции 18 ноября 1997 г.)

Исследованы поверхностные плазмон-фононные поляритоны (ППФП) типов 3 и 4 в легированных анизотропных монокристаллах SiC 6H при  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ . Показано, что при увеличении частоты плазмонов  $\nu_{p\perp} \geq 350 \text{ cm}^{-1}$  в SiC 6H проявляется ограниченная по  $K$  дисперсионная зависимость ППФП типа 3. При  $\nu_{p\perp} \geq 400 \text{ cm}^{-1}$  существует  $\nu_s(K)$  ППФП типа 4 в интервале частот  $\Omega_{\parallel}^+ < \nu < \nu_{\perp}^+$ . При увеличении концентрации свободных носителей заряда дисперсионные зависимости смещаются в высокочастотную область. Определены условия существования ППФП-3 и 4 в SiC 6H.

Оптические исследования поверхностных фонон-поляритонов изотропных твердых тел были начаты еще в 70-х годах (см., например, [1,2]). В работах Брыксина, Мирлина, Аграновича и др. было показано, что поверхностные колебания типа ПК-1 возникают в твердых телах при наличии сил дальнего действия. В монографии [2] все типы поверхностных возбуждений типа ПК-1 именуются поверхностными экситонами. Поверхностные колебания, амплитуда которых убывает на расстояниях от поверхности, близости к постоянной решетки, называют ПК-2 [1]. Измерения дисперсии поверхностных плазмон-фононных колебаний типа ПК-1 в изотропном монокристалле  $n$ -InSb методом модифицированного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) впервые выполнены в работе [3]. Взаимодействие приводит к появлению двух ветвей поверхностных плазмон-фононных мод. Первые исследования спектров поверхностных фононных поляритонов в анизотропных кристаллах были выполнены в работах Аграновича, Дубовского, Брыксина и др. [4]. Было показано, что анизотропия приводит к существованию поверхностных мод в двух случаях. Поверхностные фононные моды типа 1 существуют при любых значениях волнового вектора, а поляритоны типа 2 имеют ограничения по частоте и волновому вектору.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППФП) в одноосном полупроводнике имеют дисперсионные соотношения, число которых зависит от концентрации носителей зарядов и от ориентации оптической оси кристалла  $C$  относительно его поверхности [5]. В работе Гуревича и Тарханяна было показано, что области существования ППФП определяются анизотропией кристалла и силой электрон-фононного взаимодействия. Однако теория ППФП развита без учета ангармонизма, что не позволило исследовать спектры ППФП. Экспериментальные дисперсионные зависимости и спектры ППФП в сильно легированном гексагональном карбиде кремния SiC 6H получены в [6]. Различия этих зависимостей определяются преимущественно анизотропией эффективной массы электронов в SiC 6H [7].

В данной работе исследованы зависимости частоты и спектры НПВО ППФП  $\nu_s(K)$  гексагонального карбида кремния (политип SiC 6H) от волнового вектора  $K$  при изменении концентрации электронов в широких пределах (частоты плазмонов  $180\text{--}2500 \text{ cm}^{-1}$ ) в области существования ППФП нового типа: ППФП-3 и ППФП-4. При этом использованы взаимосогласованные параметры модели SiC 6H [8].

Монокристаллы SiC 6H кристаллизуются в структуре вюртцита с пространственной группой  $C_{6v}^4(P6_3mc)$  и характеризуются сильной анизотропией свойств плазменной подсистемы в отличие от ZnO [9]. Для SiC 6H хорошо исследован вопрос анизотропии эффективной массы электронов и коэффициентов затухания фононов и плазмонов [7]. Однако исследования влияния анизотропии плазменной подсистемы на дисперсионные зависимости ППФП и их количество в SiC 6H до настоящего времени не проведены.

При ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \parallel C$  ППФП характеризуются соотношением, когда дисперсия поверхностных волн определяется диэлектрической функцией  $\epsilon_{\perp}(\nu)$ . Оси  $x$ ,  $y$  лежат на поверхности образца,  $\epsilon_{\perp}(\nu)$  — диэлектрическая функция SiC 6H перпендикулярно оптической оси  $C$ ,  $\nu$  — частота излучения (в  $\text{cm}^{-1}$ ). В работе рассматриваются только нерadiационные поверхностные плазмон-фононные поляритоны, для которых  $K > \omega/c$  ( $\omega$  — циклическая частота). При этом наблюдаются две ветви ППФП. Высокочастотная ветвь  $\nu^+$  начинается в точке  $\nu = \nu_{\perp}$ , а низкочастотная  $\nu^-$  — от нуля. При возрастании  $K$  ( $K \rightarrow \infty$ ) частоты асимптотически приближаются к значениям частот смешанных поверхностных плазмон-фононов  $\nu_{\text{pf}}^{+,-}$

$$\nu_{\text{pf}}^{+,-} = \sqrt{0.5} \left\{ \tilde{\nu}_{\perp}^2 + \tilde{\nu}_{p\perp}^2 \pm [(\tilde{\nu}_{\perp}^2 + \tilde{\nu}_{p\perp}^2) - 4\tilde{\nu}_{\perp}^2 \tilde{\nu}_{p\perp}^2]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

$$\tilde{\nu}_{\perp}^2 = \nu_{\perp}^2 [(1 + \epsilon_{0\perp}) / (1 + \epsilon_{\infty\perp})],$$

$$\tilde{\nu}_{p\perp}^2 = \nu_{p\perp}^2 [\epsilon_{\infty\perp} / (1 + \epsilon_{\infty\perp})], \quad (1)$$

$\epsilon_{\infty\perp,\parallel}$  и  $\epsilon_{0\perp,\parallel}$  — главные значения тензора высокочастотной и статической диэлектрических проницаемостей

перпендикулярно и параллельно оси  $C$ ,  $\nu_{i\perp,\parallel}$  и  $\nu_{l\perp,\parallel}$  — частоты поперечных и продольных оптических фононов,  $\nu_{p\perp}$ ,  $\nu_{p\parallel}$  — частоты плазмонов.

В случае  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$  ППФП характеризуются дисперсионным соотношением [5]

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

$$\chi_x = Kc/\omega \quad (2)$$

и неравенствами

$$\varepsilon_{\perp} < 0, \quad K > \omega/c, \quad \varepsilon_{\parallel}(\chi_x^2 - \varepsilon_{\parallel}) < 0, \quad (3)$$

$\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  — диэлектрическая функция SiC 6H параллельно оси  $C$ . Если  $\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  и  $\varepsilon_{\perp}(\nu)$  поменять местами, то при помощи (2) можно получить  $\nu_s(K)$  для ориентации  $K \parallel C$ ,  $xy \parallel C$ . Эти зависимости соответствуют необыкновенным ППФП. Обыкновенные ППФП-1 проявляются при ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \parallel C$ , выражение (2) преобразуется при замене  $\varepsilon_{\parallel}(\nu)$  на  $\varepsilon_{\perp}(\nu)$ ; для этого случая характерны две ветви  $\nu_s(K)$  —  $\nu^{+,-}$ . При  $\varepsilon_{\perp} < 0$ ,  $\varepsilon_{\parallel} > \chi_x^2$  в отличие от изотропного случая появляются новые ветви ППФП, число и области существования которых зависят от концентрации электронов в зоне проводимости и от относительного расположения частот  $\nu_{i\perp,\parallel}$ ;  $\nu_{l\perp,\parallel}$ ;  $\nu_{p\perp,\parallel}$ ;  $\nu_{\perp\parallel}^{+,-}$ ;  $\Omega_{\perp\parallel}^{+,-}$  [5], которые определяются соотношениями

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

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

$$\nu_{\perp\parallel}^{+,-} = \sqrt{0.5} \left\{ \nu_{i\perp,\parallel}^2 + \nu_{p\perp,\parallel}^2 \pm \left[ (\nu_{i\perp,\parallel}^2 + \nu_{p\perp,\parallel}^2)^2 - 4\nu_{i\perp,\parallel}^2 \nu_{p\perp,\parallel}^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

$$\Omega_{\perp\parallel}^{+,-} = \sqrt{0.5} \left\{ \tilde{\nu}_{i\perp,\parallel}^2 + \tilde{\nu}_{p\perp,\parallel}^2 \pm \left[ (\tilde{\nu}_{i\perp,\parallel}^2 + \tilde{\nu}_{p\perp,\parallel}^2)^2 - 4\tilde{\nu}_{i\perp,\parallel}^2 \tilde{\nu}_{p\perp,\parallel}^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

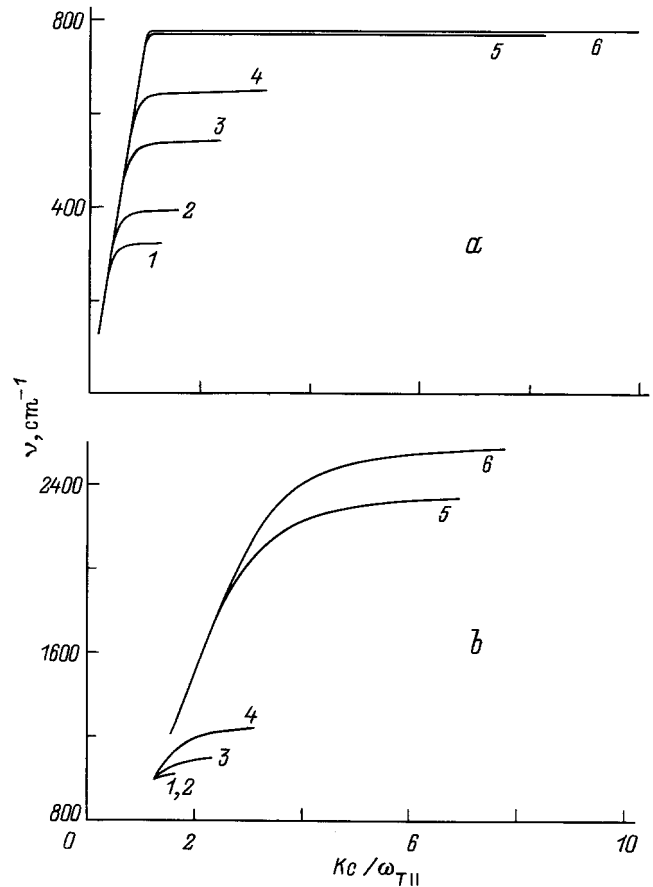
$$\tilde{\nu}_{i\perp,\parallel}^2 = \nu_{i\perp,\parallel}^2 [(\varepsilon_{0\perp,\parallel} - 1)/(\varepsilon_{\infty\perp,\parallel} - 1)],$$

$$\tilde{\nu}_{p\perp,\parallel}^2 = \nu_{p\perp,\parallel}^2 [\varepsilon_{\infty\perp,\parallel}/(\varepsilon_{\infty\perp,\parallel} - 1)]. \quad (5)$$

Максимальное число ветвей  $\nu_i(K)$ , соответствующих решениям уравнения (2), равно четырем ( $i = 1-4$ ). Частоты ППФП  $\nu_i(K)$  лежат в областях плоскости  $(\nu, K)$ , где выполняются условия (3), при  $K \gg \omega/c$  они асимптотически приближаются к частотам поверхностных плазмон-фононных колебаний, полученным при решении уравнения  $\varepsilon_{\perp}\varepsilon_{\parallel} = 1$ .

**Таблица 1.** Параметры модели монокристалла SiC 6H [4]

SiC 6H	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_{\infty}$	$\nu_i, \text{cm}^{-1}$	$\nu_l, \text{cm}^{-1}$
$E \parallel C$	10.03	6.7	788	964
$E \perp C$	9.66	6.52	797	970

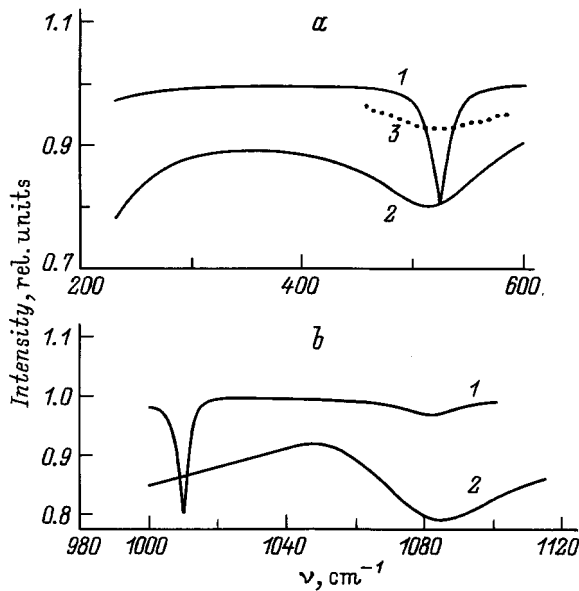


**Рис. 1.** Дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  ППФП-3,4 SiC 6H,  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ .  $a$  — ППФП-3,  $b$  — ППФП-4. Частоты плазмонов  $\nu_{p\perp} = 400$  (1), 500 (2), 740 (3), 1000 (4), 2250 (5) и  $2500 \text{ cm}^{-1}$  (6).

На рис. 1 показаны дисперсионные зависимости  $\nu_s(K)$  ППФП SiC 6H, полученные в расчете при  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$  и использовании параметров SiC 6H, которые хорошо описывают экспериментальные данные [7,8].

Для SiC 6H (табл. 1) характерны неравенства  $\nu_{i\parallel} < \nu_{i\perp} < \nu_{l\parallel} < \nu_{l\perp}$ . Плазменные частоты электронов  $\nu_{p\perp}$  и  $\nu_{p\parallel}$  SiC 6H связаны соотношением  $\nu_{p\parallel} = [(m_{\perp}^* \varepsilon_{\infty\perp})/(m_{\parallel}^* \varepsilon_{\infty\parallel})]^{1/2} \nu_{p\perp}$ . Для SiC 6H  $\nu_{p\perp} = 2.682 \nu_{p\parallel}$ , поскольку эффективная масса электрона перпендикулярна оси  $C$   $m_{\perp}^* = 0.25m_e$ , а  $m_{\parallel}^* = 1.75m_e$ , где  $m_e$  — масса свободного электрона [7]. Согласно [5],  $\nu_0 = \nu_{p\perp} [\varepsilon_{\infty\perp}/m_{\perp}]^{1/2}$ ,  $\nu_1^2 = \nu_{i\parallel}^2 [\varepsilon_{\infty\perp} \nu_{i\parallel}^2 - \varepsilon_{0\perp} \nu_{i\perp}^2] / [\mu_{\perp} (\nu_{i\perp}^2 - \nu_{i\parallel}^2)]$ . Для SiC 6H  $\nu_0 = 1.2767 \nu_{p\perp}$ , а  $\nu_1 = 4766.3 \text{ cm}^{-1}$ , т.е. имеет место неравенство  $\nu_0 < \nu_1$  ( $\nu^- < \nu_{i\parallel}$ ), что указывает на существование поверхностных мод при ограниченных значениях  $K$  (рис 1, a).

При отсутствии свободных носителей зарядов в монокристаллах SiC 6H ( $\nu_{p\perp} < 10 \text{ cm}^{-1}$ ) наблюдается только высокочастотная ветвь  $\nu_s^+(K)$ , которая начинается с частоты  $\nu = \nu_{i\perp} = 797 \text{ cm}^{-1}$  и асимптотически приближается к частоте плазмон-фононных колебаний



**Рис. 2.** Спектры НПВО SiC6H,  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ ,  $\nu_{p\perp} = 740 \text{ cm}^{-1}$ .  $\alpha$  ( $\mu\text{m}$ ) и  $\alpha$  ( $^\circ$ ): а) 1 — 90 и 24.9, 2 — 4.32 и 35, 3 — 80 и 25 (эксперимент, образец ПСЕ-3Б); б) 1 — 33 и 25, 2 — 2.4 и 35.

$\nu_{\text{pf}}^+ = 945.8 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 578.6$ . Зависимость  $\nu_s^+(K)$  соответствует необыкновенным ППФП типа 1. Для образца ОЗ-56  $\nu_{p\perp} = 180 \text{ cm}^{-1}$  и проявляются только две ветви  $\nu_s(K)$  ППФП-1:  $\nu_{\text{pf}}^+ = 948 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 687.98$  и  $\nu_{\text{pf}}^- = 54.7 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 9.1303$ . При  $\nu_{p\perp} = 350 \text{ cm}^{-1}$  в SiC6H начинает проявляться ограниченная по  $K$  дисперсионная зависимость ППФП типа 3 (ППФП-3). Граничные частоты  $\nu_{\text{pf}}^+ = 953.3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{\text{pf}}^- = 106.2461 \text{ cm}^{-1}$ . Кривая  $\nu_s(K)$  ППФП-3 начинается на частоте  $\Omega_{\parallel}^- = 112 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 0.142$  и заканчивается на частоте  $\nu_{\perp}^- = 281.1 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 1.075$ .

Для SiC6H при  $\nu_{p\perp} \geq 400 \text{ cm}^{-1}$  и взаимосвязи  $\nu_{p\perp} = 2.682 \nu_{p\parallel}$  начинает проявляться еще одна дисперсионная зависимость (рис. 1), существующая в ограниченном интервале значений волнового вектора, частоты которой лежат в диапазоне  $\Omega_{\parallel}^+ < \nu < \nu_{\perp}^+$  и которая находится выше высокочастотной  $\nu_s(K)$  ППФП типа 1. Кривые 1–6 на рис. 1, а, б получены при значениях частоты плазмонов (колебания перпендикулярно оси  $C$ )  $\nu_{p\perp} = 400, 500, 740, 1000, 2250$  и  $2500 \text{ cm}^{-1}$ . Частоты 740, 1000 и  $2190 \text{ cm}^{-1}$  соответствуют параметрам образцов ПСЕ-3Б, С-5 и SC-1. Рис. 1, а представляет  $\nu_s(K)$  ППФП-3, а рис. 1, б —  $\nu_s(K)$  ППФП-4. Для случая ППФП-3 (рис. 1, а) при  $\nu_{p\perp} = 400 \text{ cm}^{-1}$   $\nu_s(K)$  начинается при  $127.8 \text{ cm}^{-1}$  и  $Kc/\omega_{t\parallel} = 0.1622$  и заканчивается при  $318.9 \text{ cm}^{-1}$  и  $Kc/\omega_{t\parallel} = 1.2285$ .

При  $\nu_{p\perp} = 400 \text{ cm}^{-1}$  мы имеем четыре дисперсионные зависимости, две из которых ограничены по  $K$  (кривые 1 на рис. 1). Для ППФП-1  $\nu_{\text{pf}}^- = 121.3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{\text{pf}}^+ = 955.3 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} \rightarrow \infty$

(табл. 2). Граничные частоты дисперсионных зависимостей ППФП-3,4 соответственно равны  $\nu_{\perp}^- = 318.9 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 1.2285$  и  $\nu_{\perp}^+ = 999.7 \text{ cm}^{-1}$  при  $Kc/\omega_{t\parallel} = 1.3231$ .

На рис. 2 представлены расчетные спектры модифицированного внутреннего отражения (НПВО) ППФП-3 и 4 при использовании параметров образца ПСЕ-3Б при ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$  монокристалла SiC6H. Часть параметров ПСЕ-3Б представлена в табл. 2; кроме того, использованы значения коэффициентов затухания плазмонов  $\gamma_{p\perp} = 155 \text{ cm}^{-1}$  и  $\gamma_{p\parallel} = 85 \text{ cm}^{-1}$  при коэффициенте затухания фононов  $\gamma_{f\perp} = \gamma_{f\parallel} = 15 \text{ cm}^{-1}$ . Спектры рассчитаны (рис. 2, а) при воздушном зазоре между элементом НПВО из КРС-5 и образцом толщиной  $d = 90$  (кривая 1) и  $4.32 \mu\text{m}$  (кривая 2) при углах падения ИК-излучения  $\alpha$  в элементе НПВО, указанных в подписях к рисунку. Минимумы спектров соответствуют частотам  $\nu_{\text{min}} = 524$  и  $514 \text{ cm}^{-1}$ , при этом ширина спектров  $\Gamma_s = 22.5$  и  $210 \text{ cm}^{-1}$ .

На рис. 2, а (кривая 3) представлен экспериментальный спектр ППФП-3 образца ПСЕ-3Б при ориентации  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$  монокристалла SiC6H. Спектр записан при воздушном зазоре между элементом НПВО из КРС-5 и образцом толщиной  $d = 80 \mu\text{m}$  при  $\alpha = 25^\circ$  в элементе НПВО. Минимум спектра расположен в области расчетных спектров (частоты  $525\text{--}515 \text{ cm}^{-1}$ ), но ширина спектра  $3\Gamma_s \geq 600 \text{ cm}^{-1}$ , что связано со значительными коэффициентами затухания ППФП-3 образца ПСЕ-3Б.

На рис. 2, б представлены расчетные спектры ППФП-4 данного образца при  $d = 33 \mu\text{m}$  (кривая 1) и  $d = 2.4 \mu\text{m}$  (кривая 2), минимумы спектров соответствуют частотам  $\nu_{\text{min}} = 1009.5$  и  $1084 \text{ cm}^{-1}$ , при этом ширина спектров  $\Gamma_s = 4$  и  $200 \text{ cm}^{-1}$ . Для спектров НПВО ППФП-3 и 4 (кривые 2) характерны радиационные уширения. Экспериментально спектры ППФП-4 наблюдать нам не удалось, что связано со значительными коэффициентами затухания плазмонов наших образцов.

**Таблица 2.** Результаты расчета параметров ППФП-3,4

Номер образца			ПСЕ-3Б	С-5	SC-1	
$\nu_{p\perp}, \text{cm}^{-1}$	400	500	740	1000	2250	2500
$\nu_{\perp}^+, \text{cm}^{-1}$	999.7	1018.9	1094.7	1234.7	2325.7	2566.8
$Kc/\omega_{t\parallel}$	1.323	1.594	2.280	3.0545	6.673	7.618
$\Omega_{\parallel}^+, \text{cm}^{-1}$	996.7	999.6	1009.3	1024.9	1207.8	1269.4
$Kc/\omega_{t\parallel}$	1.265	1.268	1.281	1.301	1.533	1.611
$\nu_{\parallel}^+, \text{cm}^{-1}$	968		977.9	990.2	1138.5	1190.8
$\nu^+, \text{cm}^{-1}$	955	959.6	970.9	985.5	1135.8	1188
$Kc/\omega_{t\parallel}$	153	681.6	464.5	374.7	228.7	182.5
$\nu_{\perp}^-, \text{cm}^{-1}$	318.9	391.1	538.7	645.5	771	776
$Kc/\omega_{t\parallel}$	1.228	1.537	2.287	3.128	8.548	10.22
$\Omega_{\parallel}^-, \text{cm}^{-1}$	127.8	159.3	233.5	310.8	593.4	627.3
$Kc/\omega_{t\parallel}$	0.1622	0.2022	0.2964	0.3944	0.7530	0.7961
$\nu_{\parallel}^-, \text{cm}^{-1}$	121.4		222.3	296.7	580.6	616.8
$\nu^-, \text{cm}^{-1}$	121.3	151.3	222.2	296.5	580.5	616.7
$Kc/\omega_{t\parallel}$	18.023	39.15	38.65	34.44	104.7	62.55

Таким образом, в работе проведены исследования поверхностных плазмон-фононных поляритонов типов 3 и 4 в легированных анизотропных монокристаллах SiC 6H при ориентациях волнового вектора ППФП относительно поверхности и оптической оси кристалла  $K \perp C$ ,  $xy \perp C$ . Показано, что при увеличении частоты плазмонов  $\nu_{p\perp} \geq 350 \text{ cm}^{-1}$  в SiC 6H проявляется ограниченная по  $K$  дисперсионная зависимость ППФП типа 3. При  $\nu_{p\perp} \geq 400 \text{ cm}^{-1}$  существует  $\nu_s(K)$  ППФП типа 4 в ограниченном интервале значений волнового вектора, частоты которой лежат в диапазоне  $\Omega_{\parallel}^+ < \nu < \nu_{\perp}^+$  и которая находится выше высокочастотной  $\nu_s(K)$  ППФП типа 1. При увеличении концентрации свободных носителей зарядов начало и конец дисперсионной зависимости типов 3 и 4 смещаются в высокочастотную область. Определены условия существования ППФП-3 и 4 в SiC 6H. Впервые экспериментально получен спектр ППФП-3. Полученные расчетные спектры НПВО ППФП-3 и 4 доказывают возможность обнаружения поверхностных плазмон-фононных поляритонов нового типа.

## Список литературы

- [1] В.В. Брыксин, Д.Н. Мирлин, Ю.А. Фирсов. УФН **113**, 1, 29 (1974).
- [2] В.М. Агранович, В.А. Гинсбург. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Наука, М. (1979). 432 с.
- [3] В.В. Брыксин, Д.Н. Мирлин, И.И. Решина. Письма в ЖЭТФ **16**, 8, 445 (1972).
- [4] Поверхностные поляритоны / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. Наука, М. (1985). 526 с.
- [5] Л.Э. Гуревич, Р.Г. Тарханян. ФТТ **17**, 7, 1944 (1975).
- [6] Ю.А. Пасечник, Е.Ф. Венгер. Поверхность. Физика, химия, механика **8**, 63 (1982).
- [7] А.В. Мельничук, Ю.А. Пасечник. ФТТ **34**, 2, 423 (1992).
- [8] Ю.А. Пасечник, О.В. Снитко, А.Л. Бычков, В.Ф. Романенко. ФТТ **16**, 3, 719 (1974).
- [9] А.В. Мельничук, Л.Ю. Мельничук, Ю.А. Пасечник. ФТТ **36**, 9, 2624 (1994).