Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 7, с. 493 – 497

Поверхностные поляритоны в многослойных структурах GaAs/CdTe/PbTe

Н. Н. Новикова[+1)], В. А. Яковлев[+], И. В. Кучеренко[*], Г. Карчевски[×2)], С. Чуснутдинов[×2)]

[+]Институт Спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

[*]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[×]Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, PL-02668 Warsaw, Poland

Поступила в редакцию 29 августа 2018 г.

Измерены инфракрасные спектры отражения и нарушенного полного внутреннего отражения тонких пленок PbTe, осажденных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложку GaAs/CdTe. С помощью дисперсионного анализа определены для каждого из слоев параметры: высокочастотная диэлектрическая проницаемость, частоты поперечных оптических фононов и их силы осцилляторов, плазменные частоты и частоты соударений плазмы. В спектрах нарушенного полного внутреннего отражения, полученных с использованием кремниевой и алмазной призм, наблюдались поверхностные фононные, плазмон-фононные поляритоны. Построены кривые дисперсии поверхностных поляритонов.

DOI: 10.1134/S0370274X18190074

1. Введение. Недавно было доказано, что при достаточно высокой концентрации олова твердые растворы типа IV–VI, такие как $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xSe$, становятся топологическими изоляторами [1, 2]. Важно отметить, что конус Дирака на поверхности этих соединений возникает в тех сплавах, в которых энергетический спектр в объеме пленки в L-точке зоны Бриллюэна инвертирован: волновые функции электронов зоны проводимости имеют симметрию L_6^+, а дырки валентной зоны – L_6^-. Это открытие вызвало возобновление интереса к этой группе материалов. Однако, в течение многих лет интерес к узкозонным полупроводникам типа IV–VI (PbTe, PbSe, PbS) и тройным сплавам на их основе был, главным образом, связан с созданием таких приборов, как генераторы термоэлектричества [3, 4], инфракрасные (ИК) источники света, включая лазеры [5, 6], и детекторы [7, 8]. Полупроводники IV–VI успешно используют для создания ИК детекторов, так как в отличие от узкозонных полупроводников II–VI и III–V валентная зона этих полупроводников не вырождена, поэтому безызлучательная Оже-рекомбинация значительно меньше, чем в полупроводниках II–VI и III–V [9].

Зонная структура солей свинца имеет другие уникальные свойства, такие как узкая и прямая запрещенная зона с экстремумами, локализованными в четырех эквивалентных точках зоны Бриллюэна, зона проводимости и валентная зона симметричны, эффективные массы электронов и дырок малы и близки по величине.

В данной работе мы исследуем оптическими методами инфракрасное отражение при угле падения света близком к нормальному и нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО) [10] пленок PbTe высокого качества, выращенных методом молекулярной лучевой эпитаксии на гибридных подложках GaAs/CdTe(100). Постоянные решеток CdTe и PbTe близки по величине: 6.48 и 6.50 A, соответственно. Концентрация носителей в пленках PbTe составляла 10^{16} см$^{-3}$ при 300 K.

Как нами будет показано, в такой структуре возникают поверхностные поляритоны [11], информация о которых, насколько нам известно, отсутствует.

В нашей работе [12], выполненной на пленках GaAs/ZnTe/PbSnSe, были теоретически рассчитаны интерфейсные моды, возникающие между слоями исследуемой структуры. Для экспериментального исследования поверхностных поляритонов в структурах GaAs/CdTe/PbTe был использован метод НПВО.

2. Образцы и методика измерений. Были исследованы два вида структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В первом случае (образцы 092 и 096) на подложку GaAs(100) был осажден буферный слой CdTe толщиной порядка 800 и 600 нм соответственно. Поверх буферного слоя эпи-

1)e-mail: novik@isan.troitsk.ru

2)G. Karczewski, S. Chusnutdinow.

таксиально осаждалась пленка PbTe толщиной около 80 нм. Буферный слой подбирался таким образом, чтобы постоянные решеток пленки и буферного слоя были согласованы. Во втором случае на гибридной подложке GaAs/CdTe выращивалась сверхрешетка CdTe/PbTe с 25 периодами. Толщина слоев PbTe составляла примерно 7 нм (образец 023) [13].

Измерения ИК спектров отражения проводились на фурье-спектрометре фирмы "Bruker" IFS66v при комнатной температуре в широком спектральном диапазоне от 30 до 5000 $см^{-1}$ при падении излучения близком к нормальному. Спектральное разрешение составляло 4 $см^{-1}$. Спектры поверхностных поляритонов в дальней ИК области (25–550 $см^{-1}$) с разрешением 4 $см^{-1}$ в p-поляризованном свете измерялись в геометрии Отто [10] с использованием кремниевой призмы с изменением угла падения света от 20 до 45° и алмазной призмы с углом падения 45°. Спектры НПВО были измерены для всех трех образцов.

Поверхностные поляритоны (ПП) – электромагнитные возбуждения, распространяющиеся вдоль границы двух полубесконечных сред, имеющих разные знаки действительных частей диэлектрических проницаемостей и экспоненциально затухающие при удалении от границы. Если сред больше (слоистая структура), то $\varepsilon < 0$ должно быть хотя бы у одной из сред. Отрицательная $\mathrm{Re}\,\varepsilon$ может быть либо между частотами поперечного (TO) и продольного (LO) фонона – область "остаточных лучей" (Reststrahlen), либо при наличии свободных носителей ниже плазменной частоты. Это фононный и плазмонный ПП, соответственно. При этом, поскольку ПП чувствует все слои, его нельзя отнести к какому-то слою исследуемой структуры. Это возбуждение всей структуры.

Призма НПВО, установленная с некоторым зазором над образцом, позволяет согласовать волновые вектора ПП и возбуждающего их света, и тем самым, обеспечить резонансное поглощение света ПП. На границе раздела призма-зазор возникает экспоненциально затухающая при удалении от границы волна. При поднесении образца к призме волна, вышедшая из призмы, начинает взаимодействовать с образцом и перекачивается на поверхность образца (в поверхностную волну). При этом коэффициент отражения уменьшается за счет возбуждения поверхностного поляритона, и в спектре отражения появляется провал, соответствующий его частоте. Положение этого провала зависит от угла падения света, т.е. от волнового вектора. При нанесении тонкой пленки на подложку и приближении ее к призме уже присутствуют две границы, что приводит к изменению уравнения дисперсии, кривые дисперсии сдвигаются, положение пика поверхностного поляритона смещается и возможно даже его расщепление. Можно сказать, что поле ПП концентрируется непосредственно у границы раздела и экспоненциально убывает с расстоянием от нее (ближнее поле). Таким образом, ПП очень чувствительны к характеристикам поверхности и тонким пленкам на ней [11, 14, 15].

Следует отметить, что оптимальная толщина зазора между призмой и поверхностью образца должна быть порядка длины волны ПП. Спектры НПВО, как известно, очень чувствительны к толщине зазора между образцом и призмой, поскольку призма возмущает поле ПП. Для корректного измерения частоты и полуширины полосы поглощения ПП при разных углах падения света в призме подбиралась такая величина зазора, чтобы интенсивность измеряемой полосы была на уровне нескольких процентов. В этом случае возмущение ПП призмой невелико. Воздушный зазор между призмой и образцом изменялся от нескольких микрон до десятков микрон с помощью лавсановых прокладок. Частотно-угловая зависимость ПП определяет его дисперсию. Дисперсия ПП хорошо описывается теоретически, если известны диэлектрические проницаемости и пленок, и подложки, а также толщины пленок. Из угловой зависимости спектров отражения в режиме НПВО построены кривые дисперсии поверхностных поляритонов.

3. Результаты и их обсуждение. Спектры ИК отражения образцов 092, 096 и 023 приведены на рис. 1–3 при 300 K в диапазоне частот от 30 до 400 $см^{-1}$. На спектрах видны три полосы, связанные

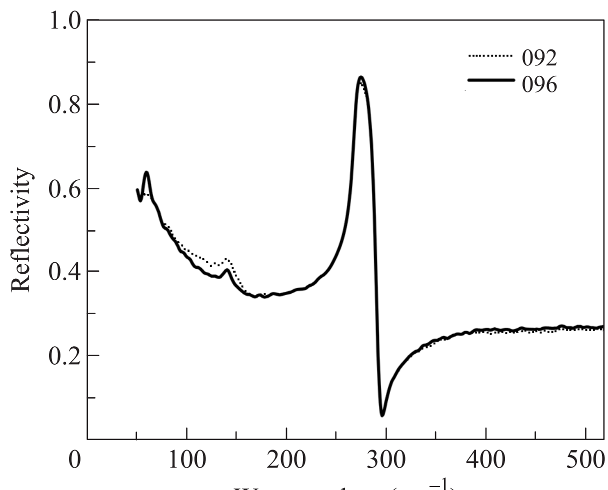

Рис.1. ИК спектры отражения образцов 092, 096 при нормальном падении

Таблица 1. Параметры пленки PbTe, подложки GaAs и буферного слоя CdTe (ν_{TO}, S_{TO}, γ, ν_p, ν_τ)

Образец	Слои	d, нм	ε_∞	ν_{TO1}, см$^{-1}$	S_{TO1}, см$^{-1}$	γ_{TO1}, см$^{-1}$	ν_{TO2}, см$^{-1}$	ν_τ, см$^{-1}$	$\nu_p/\sqrt{\varepsilon_\infty}$, см$^{-1}$
096	PbTe	83	40	36.5	1000	18.5	56.5	1500	31.6
	CdTe	630	8.24	138	77	8	–	50	69
	Объем GaAs	∞	10.1	269.4	391	2.6	–	400	117
092	PbTe	86	40	37.7	1125	30	59.6	400	16
	CdTe	730	8.24	138	87	8.0	–	57	76
	Объем GaAs	∞	10.29	269.5	387	2.55	–	323	128
023	CdTe	23.4	6.81	141.2	246	6.4	–	–	–
	PbTe	6.7	42.15	28.3	628	10	47.2	377	142
	Буферный слой	4320	6.78	141.8	230.8	6.8	–	–	–
	Объем GaAs	∞	10.14	267.5	363	2.5	–	–	–

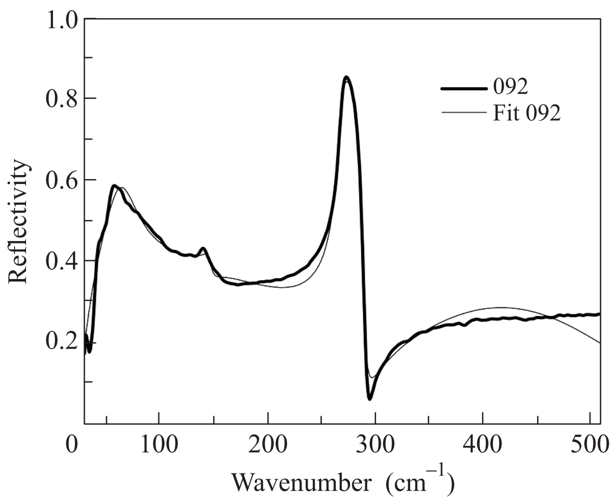

Рис. 2. ИК спектры отражения образца 092 (эксперимент и расчет) при 300 K

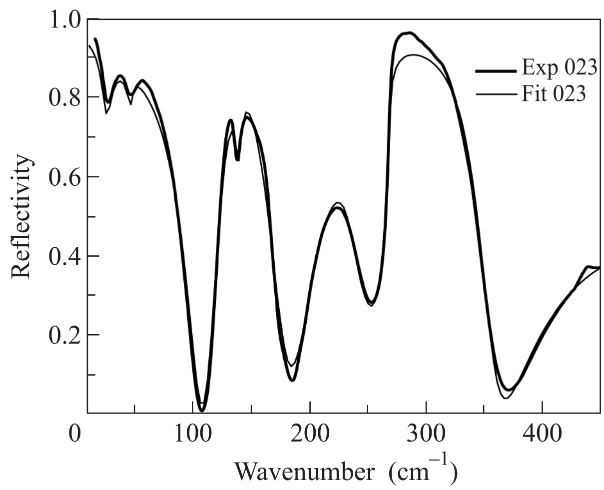

Рис. 3. Спектры ИК отражения образца 023 (эксперимент и расчет) при 300 K

с поперечными колебаниями оптических фононов: GaAs (269 см$^{-1}$), CdTe (138 см$^{-1}$), PbTe (37 см$^{-1}$). Толщина пленок PbTe составляет примерно 80 нм в образцах 092 и 096, суммарная толщина слоев PbTe сверхрешетки CdTe/PbTe в образце 023 составляет 180 нм (табл. 1). Несмотря на большую разницу в толщинах подложки, буферного слоя и пленки низкочастотная полоса PbTe видна в спектрах отражения. Мы полагаем, что это связано с большой силой осциллятора TO фонона PbTe (табл. 1).

Из спектров отражения с помощью дисперсионного анализа получены параметры оптических фононов. Для этого экспериментальный спектр сравнивался с расчетом, использующим формулы Френеля для отражения от многослойной структуры. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости каждого слоя была представлена в виде суммы высокочастотной диэлектрической постоянной ε_∞, лоренцевских осцилляторов и вклада свободных носителей (формула Друде).

$$\varepsilon(\nu) = \varepsilon_\infty(1 - \nu_p^2/(\nu^2 + i\nu\nu_\tau)) + \\ + \Sigma(S_i^2/(\nu_{\mathrm{TO}i}^2 - \nu^2 - i\nu\gamma_i)). \quad (1)$$

Здесь $\nu_{\mathrm{TO}i}$ – частота i-го поперечного фонона, S_i и γ_i – его сила осциллятора и затухание, соответственно, $\nu_p = (4\pi ne^2/m^*)^{1/2}$ – плазменная частота свободных носителей, ν_τ – частота соударений свободных носителей. Эти параметры подбирались таким образом, чтобы получалось наилучшее согласие с экспериментом. Для этого использовалась программа SCOUT [16, 17]. Изменяя подгоночные параметры, мы стремились минимизировать разницу между экспериментальным и расчетным спектрами. В табл. 1 приведены параметры оптических фононов, сил их осцилляторов и затухание поперечной моды для трех образцов многослойных структур (092, 096, 023), вычисленные вышеуказанным способом. В пленках PbTe (образцы 092 и 096) и сверхрешетке (образец 023) наблюдаются две частоты оптических фононов: TO_1 (29–37 $см^{-1}$) и TO_2 (47–55 $см^{-1}$) (табл. 1). На рисунке 3 хорошо видно расщепление низкочастотной полосы (образец 023). Частоту TO_1 мы связываем с частотой TO фонона пленки PbTe, с решеткой типа NaCl, имеющей большую силу осциллятора (заметим, что частота TO фонона в эпитаксиальных пленках PbTe $\nu_{TO} = 32\,см^{-1}$ [18]), в то время как частоту TO_2 можно отнести к структурно-деформированному переходному слою на границе слоев CdTe/PbTe [19]. Деформация связана с тем, что CdTe имеет структуру цинковой обманки, а PbTe – каменной соли. Заметим, что образцы 096 и 092 имели концентрацию носителей $\approx 10^{16}\,см^{-3}$ при 300 K, в то время как для образца 023 рассчитанная концентрация носителей была на два порядка больше ($8.5 \cdot 10^{17}\,см^{-3}$ [13]). В этом образце возникает плазмон – LO фононное взаимодействие, так как частоты $\nu_p/(\varepsilon_\infty)^{1/2} = 142\,см^{-1}$ и $\nu_{LO} = 119\,см^{-1}$ близки по величине, в то время как подобное взаимодействие не наблюдается для образцов с низкой концентрацией носителей.

Проведены измерения спектров НПВО (ATR) с алмазной и кремниевой призмами в области от 25 до 550 $см^{-1}$ с различными толщинами зазоров между призмой и образцом для двух видов структур (рис. 4, 5). В спектрах НПВО в образцах 092 и 096

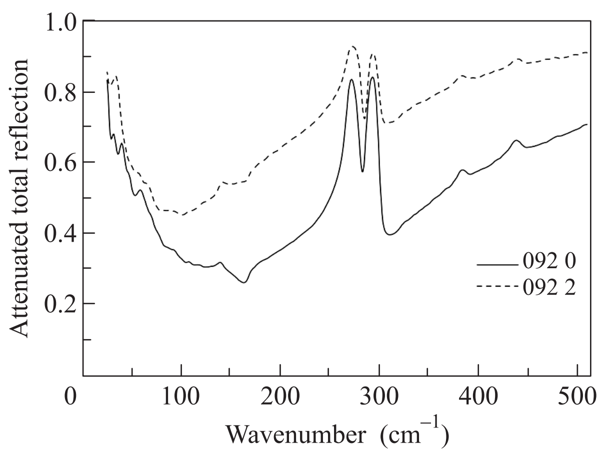

Рис. 4. Спектры НПВО образца 092 с различными толщинами воздушных зазоров (0 и 2 прокладки по 6 мкм) для алмазной призмы при угле падения 45°

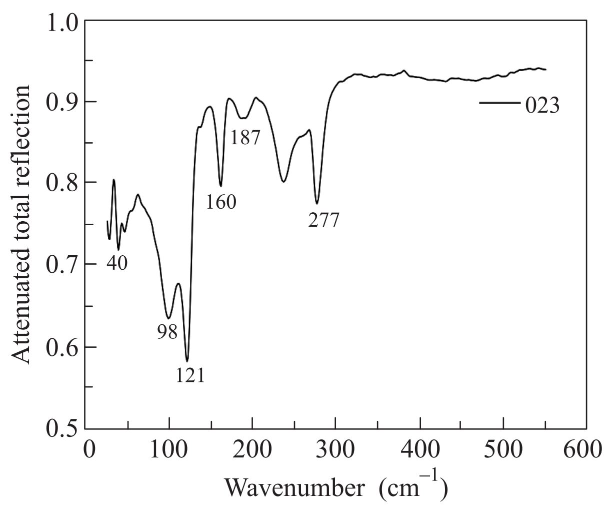

Рис. 5. Спектр НПВО многослойного образца 023 для алмазной призмы при угле падения 45°

отчетливо видны минимумы на частотах 282, 163, 53, 34 $см^{-1}$. Минимумы при 282 и 160 $см^{-1}$ мы связываем с поверхностными фононными поляритонами GaAs и CdTe, минимумы при 34 и 53 $см^{-1}$ относятся к поверхностным фононным поляритонам пленки PbTe и переходного слоя CdTe/PbTe, соответственно. В то же время в образце 023 (рис. 5) отчетливо наблюдаются 6 минимумов на частотах 277, 187, 160, 121, 98, 40 $см^{-1}$. Минимум при 277 $см^{-1}$ мы связываем с поверхностным фононным поляритоном GaAs, минимумы 40 и 187 $см^{-1}$ обусловлены плазмон – LO фононным взаимодействием с ветвями ν_- и ν_+ и могут быть интерпретированы как плазмон-фононные поляритоны. Фононный поляритон на частоте 160 $см^{-1}$ обусловлен отрицательным ε в слое CdTe. Минимумы 121, 98 $см^{-1}$ мы интерпретируем как фононные поверхностные поляритоны в слоях PbTe и переходных слоях PbTe/CdTe.

Кривые дисперсии ПП были рассчитаны по формулам, приведенным в [20]. На рисунке 6 представлены рассчитанные кривые дисперсии ПП для трехслойной структуры GaAs/CdTe/PbTe. По оси абсцисс отложен безразмерный волновой вектор, зависящий от угла падения излучения θ и ε материала, из которого изготовлена призма ($\kappa_x = (\varepsilon_{\rm prism})^{1/2} \cdot \sin\theta$). Кружки и квадраты – экспериментальные точки, полученные из НПВО спектров с использованием кремниевой и алмазной призм, для углов падения света 20, 22, 24, 45°. ПП около 300 $см^{-1}$ обусловлен отрицательной диэлектрической проницаемостью GaAs, но модифицирован пленками CdTe и PbTe. ПП при 150 $см^{-1}$ обусловлен отрицательной диэлектрической про-

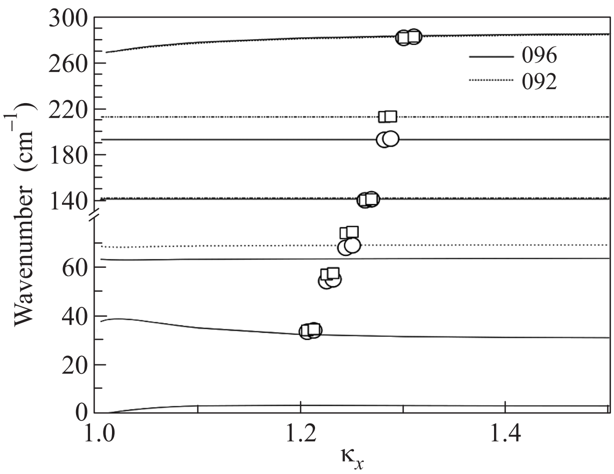

Рис. 6. Расчетные кривые дисперсии поверхностных поляритонов для образцов 092 и 096. Кружки (092) и квадраты (096) – экспериментальные точки, полученные с использованием кремниевой и алмазной призм, для углов падения 20, 22, 24, 45°

ницаемостью CdTe, ПП в интервале 34–74 см$^{-1}$ связаны с фононами пленки PbTe и переходным слоем CdTe/PbTe. Из рисунка 6 видно, что экспериментальные частоты ПП лежат довольно близко к соответствующим кривым дисперсии.

4. Заключение. Таким образом, в настоящей работе впервые в многослойной структуре GaAs/CdTe/PbTe экспериментально наблюдались поверхностные фононные и плазмон-фононные поляритоны. Рассчитаны кривые дисперсии поверхностных поляритонов. Частоты поверхностных фононных поляритонов удовлетворительно согласуются с расчетными данными.

Это исследование было частично поддержано Национальным Научным Центром (Польша). Грант # UMO-2017/25/B/ST3/02966.

1. Y. Tanaka, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, Z. Ren, M. Novak, K. Segawa, and Y. Ando, Phys. Rev. B **87**, 155105 (2013).
2. P. Dziawa, B. J. Kowalski, K. Dybko, R. Buczko, A. Szczerbakow, M. Szot, E. Lusakowska, T. Balasubramanian, B. M. Wojek, M. H. Berntsen, O. Tjernberg, and T. Story, Nat. Mater. **11**, 1023 (2012).
3. J. W. Doak and C. Wolverton, Phys. Rev. B **86**, 144202 (2012).
4. P. D. Borges, J. E. Petersen, L. Scolfaro, H. W. L. Alves, and T. H. Myers, J. Solid State Chem. **227**, 123 (2015).
5. Z. Feit, M. McDonald, R. J. Woods, V. Archambault, and P. Mak, Appl. Phys. Lett. **68**, 738 (1996).
6. A. Hochreiner, T. Schwarzl, M. Eibelhuber, W. Heiss, G. Springholz, V. Kolkovsky, G. Karczewski, and T. Wojtowicz, Appl. Phys. Lett. **98**, 021106 (2011).
7. V. Kasiyan, Z. Dashevsky, C. M. Schwarz, M. Shatkhin, E. Flitsiyan, L. Chernyak, and D. Khokhlov, J. Appl. Phys. **112**, 086101 (2012).
8. S. Chusnutdinow, M. Szot, T. Wojtowicz, and G. Karczewski, AIP Adv. **7**, 035111 (2017).
9. P. C. Findlay, C. R. Pidgeon, R. Kotitschke, A. Hollingworth, B. N. Murdin, C. J. G. M. Langerak, A. F. G. van der Meer, C. M. Ciesla, J. Oswald, A. Homer, G. Springholz, and G. Bauer, Phys. Rev. B **58**, 12908 (1998).
10. A. Otto, Zs. Phys. **216**, 398 (1968).
11. *Surface Polaritons. Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces*, ed. by V. M. Agranovich and D. L. Mills, North-Holland Publ., Amsterdam (1982), v. 1, part 1, p. 11.
12. Н. Н. Новикова, В. А. Яковлев, И. В. Кучеренко, В. С. Виноградов, Ю. А. Алещенко, А. В. Муратов, G. Karczewski, S. Chusnutdinow, ФТП **52**, 38 (2018).
13. Н. Н. Новикова, В. А. Яковлев, И. В. Кучеренко, G. Karczewski, Ю. А. Алещенко, А. В. Муратов, Т. Н. Заварицкая, Н. Н. Мельник, ФТП **49**, 658 (2015).
14. В. М. Агранович, УФН **115**, 199 (1975).
15. E. A. Vinogradov, Phys. Rep. **217**, 159 (1992).
16. W. Theiβ, *The SCOUT through CAOS, Manual of the Windows application SCOUT*.
17. W. Theiβ, Surf. Sci. Rep. **29**, 91 (1997).
18. P. M. Amirtharaj, B. L. Bean, and S. Perkowitz, J. Opt. Soc. Am. **67**, 939 (1977).
19. Sh. Jin, Ch Cai, G. Bi, B. Zhang, H. Wu, and Y. Zhang, Phys. Rev. B **87**, 235315 (2013).
20. Г. Н. Жижин, М. А. Москалева, Е. В. Шомина, В. А. Яковлев, *Поверхностные поляритоны*, Наука, М. (1985), гл. 3, с. 70.