

Е. И. Гацкевич, Г. Д. Ивлев, С. П. Жавный, Д. Н. Шараев

## ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ Si, Ge, GaAs и InSb, РАСПЛАВЛЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ

При плавлении Si и Ge и соединений  $A_3B_5$  (GaAs, InSb) происходит разрыв межатомных ковалентных связей полупроводника, валентные электроны становятся практически свободными, придавая жидкой фазе физические свойства расплавленного металла. Образование расплавленного слоя при лазерно-индуцированном фазовом переходе полупроводник – жидкий металл легко идентифицировать по скачку коэффициента отражения зондирующего излучения (ЗИ) от области импульсного нагрева.

Оптические свойства расплавов Si и Ge, образующихся в стационарных условиях нагрева этих полупроводников, известны [1, 2]. Жидкая фаза Ge, возникающая при наносекундном лазерном нагреве полупроводника, согласно [3] не отличается по оптическим свойствам от получаемой в равновесных условиях плавления. В случае Si такое соответствие имеет место не всегда.

В частности, это следует из работы [4], где проводились измерения комплексного показателя преломления  $\tilde{n} = n + ik$  жидкого Si на  $\lambda = 633$  нм в условиях плавления полупроводника при наносекундном воздействии излучения KrF эксимерного лазера. В соответствии с полученными данными  $n = 3,6$  и  $k = 5,6$ , тогда как измерения К.М. Шварева и др. [1] дают  $n = 2,8$ ;  $k = 5,2$ . С данными [1] не согласуются также результаты измерений [5] на  $\lambda = 1,06$  мкм комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  расплава Si, образующегося при наносекундном лазерном воздействии. Здесь  $\epsilon' = n^2 - k^2$ ,  $\epsilon'' = 2nk$ .

Исследовалось также поведение эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$  на  $\lambda = 633$  нм отражательной способности  $R$  жидкой фазы в условиях двухимпульсного нагрева и плавления Si и Ge [6]. Указанные параметры и величины  $R$ , измеренные в условиях эксперимента, удовлетворительно согласуются с соответствующими данными для расплавов Si и Ge, найденными на основе результатов работ [1, 2].

В отдельных экспериментах [7, 8] в условиях лазерно-индуцированного плавления проводились измерения отражательной способности GaAs на разных длинах волн ЗИ. Установлена величина показателя поглощения  $k = 3,0 \pm 0,2$  жидкой фазы GaAs на  $\lambda = 514$  нм [8]. Однако обе составляющие комплексного показателя преломления

не определялись. В равной мере это относится и к расплаву InSb, оптические параметры которого в указанных условиях не измерялись.

В данной работе проведено исследование оптических параметров в ближней инфракрасной области спектра расплавов перечисленных полупроводниковых материалов в условиях образования жидкой фазы под действием нанопульсного лазерного излучения.

Механически и химически полированные пластины кристаллических Si, Ge, GaAs и InSb с концентрацией легирующей примеси *n*- или *p*-типа не выше  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> облучались пучком излучения рубинового лазера при длительности моноимпульса 80 нс по уровню 0,5. Неоднородность распределения энергии в пятне размером ~2х6 мм не превышала ±5%. Пучок ЗИ ( $\lambda = 1,06$  мкм), ограниченный по сечению диафрагмой 0,5 мм, помещенной перед образцом, направлялся на его поверхность под углами  $\varphi_1 = 75,4^\circ$  и  $\varphi_2 = 60^\circ$  относительно нормали и был поляризован в плоскости падения. Отраженный от образца пучок ЗИ детектировался фотозлектронным умножителем ЭЛУ-ФТК, выходной сигнал которого подавался на вход запоминающего осциллографа С8-14. Время нарастания переходной характеристики тракта ФЭУ-осциллограф не превышало 8 нс.

Использовался метод определения *n* и *k* [9], основанный на измерении коэффициентов зеркального отражения при двух углах падения ЗИ *p*-поляризации на исследуемый объект. В соответствии с [9] коэффициент отражения  $R_p$  определяется выражением

$$R_p(\varphi) = \frac{(a - \cos \varphi)^2 + b^2}{(a + \cos \varphi)^2 + b^2} \frac{(a - \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi)^2 + b^2}{(a + \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi)^2 + b^2},$$

где  $a = 0,707 \sqrt{n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi)^2 + 4n^2 k^2}}$ ,

$b = 0,707 \sqrt{k^2 - n^2 + \sin^2 \varphi + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi)^2 + 4n^2 k^2}}$ .

Коэффициенты  $R_p(\varphi_1)$  и  $R_p(\varphi_2)$  отражения ЗИ от того или другого материала в жидкой фазе измерялись с помощью призмы полного внутреннего отражения (ПВО). Проводилось трехкратное, т.е. не менее, чем из трех осциллограмм, измерение напряжения сигнала (на нагрузке ФЭУ), соответствующего отражению ЗИ от расплава, и напряжения сигнала с установленной вместо образца призмой ПВО. Затем вычислялись средние значения  $R_p(\alpha)$  и  $R_p(\varphi)$  и по ним с использованием номограммы (рис. 1), рассчитанной на основе представленной

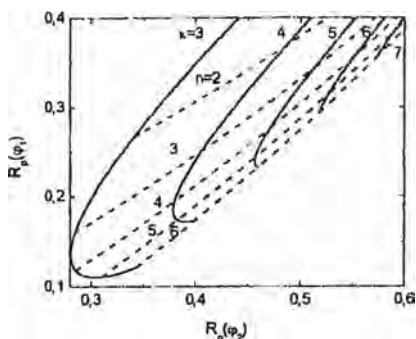


Рис. 1. Номограмма для определения  $n$  и  $k$  по результатам измерений коэффициента отражения при двух углах падения зондирующего излучения

выше формулы для  $R_p(\varphi)$ , определялись величины  $n$  и  $k$ . При проведении измерений плотность энергии облучения образцов устанавливалась такой, чтобы время существования расплава было 0,2–0,4 мкс, что достигалось при двух-трехкратном превышении плотности энергии над порогом плавления поверхности того или другого образца. Пороги плавления составляют ~1; 0,4; 0,3 и 0,15 Дж/см<sup>2</sup> соответственно для Si, Ge, GaAs и InSb.

Представленные в табл. 1 значения  $n$  и  $k$  определены с абсолютной погрешностью до  $\pm 0,4$ , которой соответствует погрешность  $\pm 2\%$  в величинах  $R$ , найденных (по  $n$  и  $k$ ) для случая нормального падения ЗИ на поверхность зоны лазерного воздействия. Результаты эксперимента, относящиеся к расплавам Si и Ge, согласуются с данными измерений, выполненных авторами [1] и [2]. В соответствии с этими данными на  $\lambda = 1,06$  мкм  $n = 4,8$  и  $k = 6,9$  для Si [1] и 5,0 и 7,1 для Ge [2]. Значения  $n$  и  $k$ , указанные в скобках, рассчитаны по модели свободных электронов, согласно которой [10]

$$n^2 - k^2 = 1 - \frac{4\pi N e^2}{m} \frac{1}{\omega^2 + \gamma^2} \quad \text{и} \quad nk = \frac{2\pi N e^2}{m\omega} \frac{\gamma}{\omega^2 + \gamma^2}$$

где  $N$  – концентрация свободных электронов в единице объема,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $\omega$  – круговая частота излучения,  $\gamma$  – величина, обратная времени релаксации электронов  $\tau_e$ . В расчетах полагалось, что концентрация электронов  $N$  в расплавах GaAs и InSb, как и в Si и Ge, равна четырем на атом. В таком случае она рассчиты-

вается по величинам плотности расплавов [11] и массам атомов Ga, As, In и Sb. Используемые значения  $\tau$ , приведены в работе [12].

Таблица 1

Оптические параметры расплавов на  $\lambda = 1,06$  мкм

Расплав	$R_p(\varphi), \%$	$R_s(\varphi), \%$	$n$	$k$	$R(\varphi=0)$
Si	39	58,6	4,5 (5,1)	6,7(7,2)	76 (76,4)
Ge	38,4	59	4,9 (4,8)	7,0 (7,5)	77 (77)
GaAs	24	44	4,4 (4,3)	4,7 (5,5)	66 (71)
InSb	30	49	3,9 (4,1)	5,2 (6,2)	69 (75)

Как видно из табл. 1, расчетные и экспериментальные значения  $n$  близки, за исключением данных по Si. Вместе с тем расчет дает явно завышенные величины  $k$  для всех расплавов. Сопоставление и анализ полученных данных и результатов исследований [13] эффекта послеплавания в расплавах полупроводников позволило предположить, что установленное различие по  $k$  связано с тем, что в нашей ситуации, как и в равновесных (точнее квазиравновесных) условиях плавления, концентрация электронов в образующейся жидкой фазе несколько ниже предельно возможной. Другими словами, при фазовом переходе не происходит разрыва всех ковалентных связей и в образующемся расплаве (ненагретом) содержатся кластеры твердой фазы. По данным [13] процентное по объему содержание кластеров  $\psi$ , например, равное 6,5% в расплаве Ge, падает до нуля лишь при его нагреве до температуры  $T$  на  $\sim 100$  К большей равновесной точки фазового перехода  $T_m$ . В существенно неравновесных условиях наносекундного лазерно-индуцированного плавления Ge (и других полупроводников) температурный интервал, в котором происходит распад кластеров, может быть намного больше.

Рассчитать оптические параметры расплава, содержащего кластеры твердой фазы, т.е. двухкомпонентной смеси, позволяет соотношение Бреггемана [14]. Вычисления  $n$  и  $k$  в зависимости от  $\psi$ , выполненные на основе этого соотношения, и оптических параметров жидкой фазы, рассчитанных по модели свободных электронов, показывают (рис. 2), что повышение процентного содержания кластеров приводит к линейному уменьшению составляющих комплексного показателя преломления того или иного расплава. Изменение  $k(\psi)$ , однако, намного значительнее, чем  $n(\psi)$ . Повышение доли кластеров приводит к более глубокому проникновению излучения в расплав.

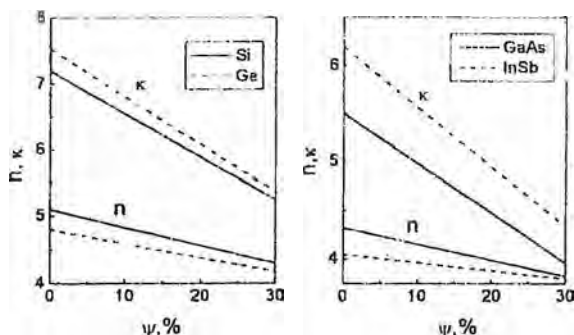


Рис. 2. Комплексные показатели преломления расплавов в зависимости от содержания кластеров твердой фазы

Пользуясь полученными зависимостями  $k(\psi)$ , можно определить расчетные значения  $\psi$ , соответствующие найденным в эксперименте значениям  $k$  для каждого расплава, представленным в табл. 1. Для расплавов Si и Ge получаем одинаковое значение  $\psi = 7,5\%$ , которое весьма близко к соответствующим данным [13], равным  $9,5\%$  (Si) и  $6,5\%$  (Ge) при температурах  $T_m$ . Одинаковое значение  $\psi = 16\%$  получается и для расплавов GaAs и InSb. Оно не отличается от величины  $\psi$  для расплава GaAs ( $T = T_m$ ), представленной в [13], но не согласуется с данными этой работы о процентном содержании кластеров ( $5\%$ ) в жидкой фазе InSb.

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем.

Получены экспериментальные данные об оптических параметрах расплавов на  $\lambda = 1,06$  мкм, образующихся в условиях наносекундного лазерного нагрева субмикронных поверхностных слоев монокристаллов Si, Ge, GaAs и InSb. На основе модели свободных электронов и соотношения Бреггемана проведен расчет комплексных показателей преломления расплавов в зависимости от объемной доли кластеров твердой фазы. Установлены расчетные значения процентного содержания кластеров в жидкой фазе исследованных материалов, соответствующие экспериментальным значениям показателя поглощения расплавов на указанной длине волны зондирующего излучения.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф99-184.

#### Литература

1. Шварев К.М., Лугов Б.А., Генов П.В. Оптические свойства жидкого кремния // ФТТ 1971 Т. 16, № 11 С. 3246-3248
2. Hodgson J.N. The optical properties of liquid germanium, tin and lead // Philos Mag. 1961 Vol. 6 P. 509-515.
3. Карлов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В. Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения // ФТТ 1986 Т. 20, № 11. С. 1945-1969
4. Lowndes D.H., Jethson G.E.(Jr), Wood R.F. Time-resolved optical studies of silicon single during nanosecond pulsed-laser irradiation // Phys. Rev. B 1986 Vol. 26, № 12. P. 6747-6755.
5. Li K.D., Faucher P.M. Picosecond determination of the dielectric function of liquid silicon at 1064 nm // Sol. St. Com. 1987 Vol. 61, № 3 P. 207-209.
6. Gusakov G.M., Komarnitskii A.A., Em A.S. Dynamics of optical parameters of silicon and germanium single crystals during two-pulsed nanosecond laser irradiation // Phys. Stat. Sol. A 1988 Vol. 107, № 1 P. 261-271.
7. Solis J., Afonso C.N., Picueras J. Excimer laser melting of GaAs real-time optical study // J Appl Phys 1992 Vol. 71 № 2 P. 1032-1034
8. Lin J.M., Malvezzi A.M., Bloembergen M. Picosecond laser melting and evaporation of GaAs surfaces // Appl Phys Lett 1986. Vol. 49, № 11. P. 622-624
9. Пришивалко А.П. Отражение света от поглощающих сред. Мн.: Изд. АН БССР. 1963. 430 с.
10. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под общ. Ред. А.Е. Шейндлина М. Энергия 1974 472 с
11. Регель А.Р., Глазов В.М. Физические свойства электронных расплавов М.: Наука 1980 296 с
12. Образование метастабильных состояний жидкой фазы в процессе плавления полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  наносекундными лазерными импульсами А.Н. Васильев, С.Ю. Карлов, Ю.В. Ковальчук и др. // ЖЭТФ 1989. Т. 96, № 4 (10). С. 1459-1472.
13. Глазов В.М. Современное развитие исследований эффекта послеплавления в расплавах полупроводников // Неорганические материалы 1996 Т. 32, № 11. С. 1287-1305
14. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами М.: Мир. 1986 664 с