

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛОВ Ge С ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Э.И. Заварицкая, Е.Г. Сокол

Впервые изучена фотопроводимость кристаллов германия с чистыми поверхностями, полученными сколом в жидком гелии. Обнаружено существенное возрастание фотопроводимости таких кристаллов в области собственного поглощения света. Установлено, что после окисления поверхностей избыточная проводимость исчезает. Обнаруженный эффект объяснен формированием проводящего дырочного канала вблизи чистой поверхности германия из-за захвата электронов на оборванные связи.

Высокая степень чистоты поверхности, возникающей при сколе кристаллов в жидком гелии, а также подавление тепловых колебаний решетки в условиях гелиевых температур создают уникальные возможности для исследования электронных процессов на поверхности твердых тел, в особенности в невырожденных полупроводниковых кристаллах, проводимость которых $\lesssim 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}$ при $T = 4,2 \text{ К}$.

Расколотые в жидком гелии кристаллы германия явились первым объектом исследований такого рода [1-4]. Показано, что поверхностная проводимость σ_s при $T = 4,2 \text{ К}$ крайне чувствительна к отклонениям от идеальности в структуре поверхности и ее чистоте: в случае грубо шероховатых поверхностей величина σ_s может достигать значений $\sim 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$, а при адсорбции примесей (порядка 1% моно-слоя) $\sim 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$.

В настоящей работе для исследований выбрана макроскопически однородная, непроводящая свежесколотая в жидком гелии зеркально-гладкая поверхность германия с величиной $\sigma_s \lesssim 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}$. Для диагностики поверхности использована фотопроводимость в области фундаментального поглощения света в кристаллах Ge при $1,0 < \lambda < 1,8 \text{ мкм}$.

Минимальный энергетический зазор E_0 для прямых оптических переходов в германии превышает пороговую энергию для непрямых переходов [5]. Последняя совпадает с величиной E_g — минимальным энергетическим промежутком между зоной проводимости и валентной зоной. Спектр собственного поглощения света при $T = 4,2 \text{ К}$ можно разделить на два участка: область $\lambda < \lambda_0 = hc/E_0 = 1,4 \text{ мкм}$, где основную роль играют прямые переходы и коэффициент поглощения α превышает 10^3 см^{-1} , и область $1,4 < \lambda < 1,7 \text{ мкм}$, где идут переходы с участием фононов [6], коэффициент α невелик и фотогенерация может охватывать весь объем кристалла. Это позволяет разделить вклады объемных и поверхностных эффектов.

В настоящей работе изучена фотопроводимость σ_{ph} кристаллов p-Ge с поверхностями, сколотыми в жидком гелии, и окисленными поверхностями. Монохроматический свет падал нормально к поверхности (рис. 1), его интенсивность регулировалась с помощью калиброванных нейтральных фильтров в диапазоне $10^{11} \lesssim N_{ph} \lesssim 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Измерения σ_{ph} проведены при $T = 4,2 \text{ К}$ на постоянном токе в области линейной зависимости тока от напряжения. Результаты измерений приведены на рис. 2 и 3.

В области объемного возбуждения света величина σ_{ph} растет пропорционально числу поглощенных фотонов и не зависит от способа обработки поверхности. При этом отчетливо проявляются особенности в зависимости $\sigma_{ph}(\lambda)$, обусловленные вкладом фононов в процессы поглощения света: поперечного акустического фонона с энергией 7,8 мэВ, продольного акустического фонона с энергией 27,6 мэВ и поперечного оптического фонона с энергией 36,2 мэВ.

Результаты измерений фотопроводимости при $\lambda < 1,6 \text{ мкм}$ продемонстрировали неожиданно сильную зависимость величины σ_{ph} от свойств освещаемой поверхности. Как видно из данных, приведенных на рис. 3, в кристаллах Ge с традиционной обработкой поверхности (полировкой, травлением, окислением) фотопроводимость резко падает при уменьшении длины волны вблизи порогового значения $\lambda_0 = 1,4 \text{ мкм}$, а в свежесколотых кристаллах при этом величина σ_{ph} достигает максимального значения.

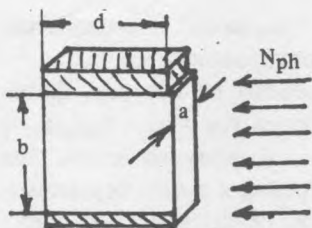


Рис. 1. Форма образца и расположение контактов. $d = 1$ см, $a = 0,1 - 0,2$ см, $b = 1$ см — расстояние между токовыми контактами (заштрихованы); N_{ph} — число падающих фотонов (за вычетом отраженных).

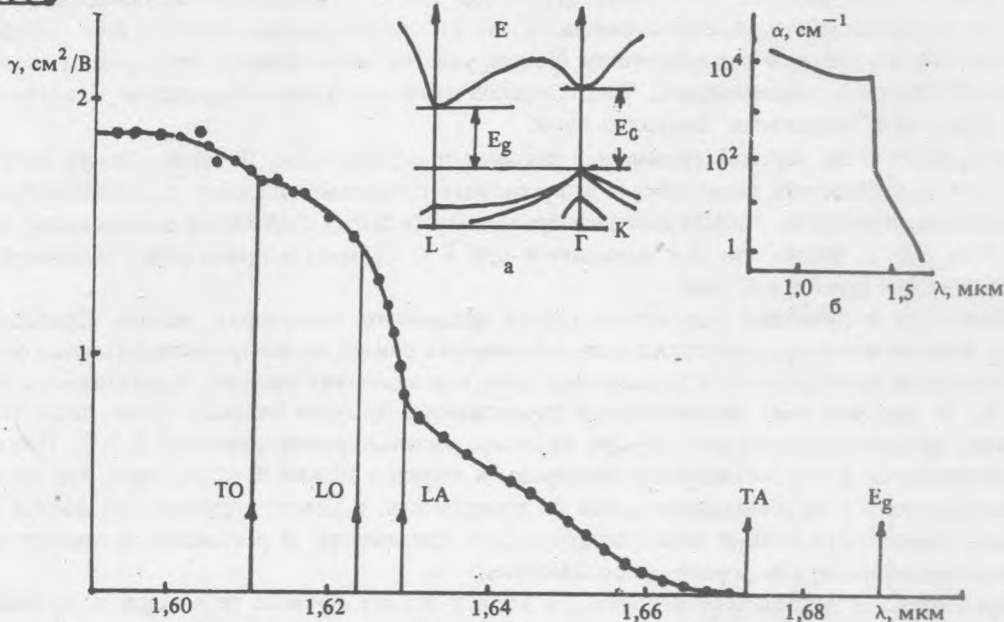


Рис. 2. Зависимость фоточувствительности $\gamma = \sigma_{ph}/eN_{ph}$ от длины волны λ . Стрелками отмечены значения λ , соответствующие энергиям фотонов, равным E_g , $E_g + TA$; $E_g + A$; $E_g + O$; $E_g + TO$. На вставке схематически изображены диаграмма зонной структуры Ge/S (а) и спектральная зависимость коэффициента поглощения α в германии при $T = 4,2$ К/б).

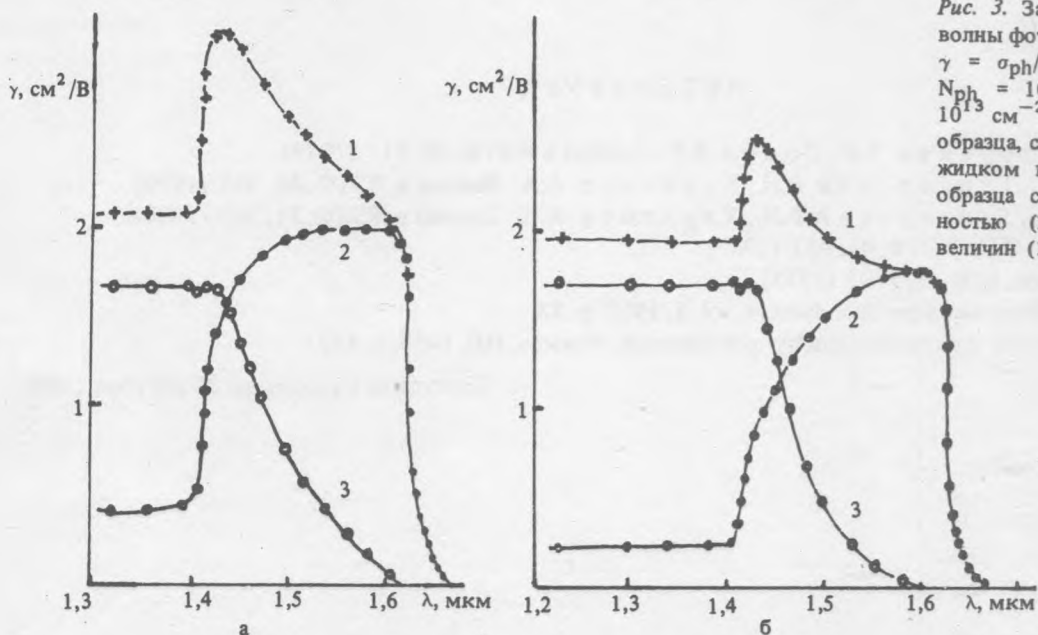


Рис. 3. Зависимость от длины волны фоточувствительности $\gamma = \sigma_{ph}/eN_{ph}$ при значениях $N_{ph} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (а) и $10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (б) для образца, свежеотполированного в жидком гелии (1); того же образца с окисленной поверхностью (2) и разности этих величин (3).

Полученную в опытах спектральную зависимость σ_{ph} в кристаллах Ge с "реальной" поверхностью можно объяснить в рамках классических представлений о фотопроводимости в полупроводниках.

В условиях объемного возбуждения, когда носители равномерно распределены по образцу, фотопроводимость определяется параметрами самих кристаллов: $\bar{\sigma}_{ph} = eN_{ph} \mu_n \tau_{ph}$; здесь $\tau_{ph} = \tau_n + \tau_p \mu_p / \mu_n$ — обобщенное время жизни, μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок; τ_n, τ_p — их времена жизни. При поверхностном возбуждении кристалла распределение фотовозбужденных электронов и дырок неравномерно. При этом полный фототок $J/a = eN_{ph} \mu_n \tau_{ph} EF(\alpha)$, где E — напряженность электрического поля; $F(\alpha) < 1$ — поправочная функция, учитывающая гибель фотовозбужденных носителей на поверхности [7]. В простейшем случае, впервые рассмотренном Шокли, удается легко описать этот процесс, введя понятие скорости поверхностной рекомбинации. Такой подход позволил удовлетворительно описать результаты измерений образцов с "реальными" поверхностями.

По-иному ведут себя образцы германия с чистыми поверхностями. Во всей области длин волн $\lambda < 1,6$ мкм фотопроводимость таких образцов превышает предельное значение $\bar{\sigma}_{ph}$, определяемое объемными параметрами кристалла. Избыточная фотопроводимость $\Delta \sigma$ (вклад чистой поверхности) представлена кривой 3 на рис. 2. Видно, что $\Delta \sigma$ появляется при $\lambda < 1,6$ мкм и затем, резко возрастая, достигает постоянного значения при $\lambda = 1,43$ мкм.

Для объяснения полученных результатов можно предложить следующую модель. Предположим, что при расколе кристаллов в жидком гелии часть оборванных связей на поверхности остаются свободными, и их энергетические уровни лежат в запрещенной зоне при значениях энергии, превышающих край валентной зоны E_v . В этих условиях поверхностная проводимость σ_s будет близка к нулю, поскольку валентные электроны из кристалла не могут перейти на поверхностные уровни с энергией $E > E_v$. При освещении кристалла появляются фотовозбужденные электроны и дырки и можно предположить, что часть электронов будет захватываться на оборванные связи на поверхности, а компенсирующие их дырки — удерживаться вблизи поверхности силами электростатического притяжения. В результате возникнет приповерхностный проводящий канал с дырочной проводимостью.

Если предложенная модель справедлива, то вблизи порога прямых переходов в кристаллах Ge с чистыми поверхностями следует ожидать смены механизма формирования фотопроводящего слоя — от биполярной диффузии к монополярному процессу концентрации дырок вблизи поверхности скола. Экспериментальная проверка предложенной модели является целью ближайших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Сокол Е.Г. Письма в ЖЭТФ, **30**, 517 (1979).
2. Осипьян Ю.А., Тальянский В.И., Харламов А.А. Письма в ЖЭТФ, **30**, 253 (1979).
3. Осипьян Ю.А., Тальянский В.И., Харламов А.А. Письма в ЖЭТФ, **31**, 760 (1980).
4. Заварицкая Э.И. ЖЭТФ, **93**, 952 (1987).
5. Herman F. Proc. IRE, **43**, 1703 (1955).
6. McLean T.P. Progress in Semiconductors, vol. 5, 1960, p. 53.
7. Шокли В. Теория электронных полупроводников, Москва, ИЛ, 1953, с. 412.

Поступила в редакцию 28 декабря 1989 г.