

ФОТОЭДС НА ПОВЕРХНОСТИ СКОЛА ГЕРМАНИЯ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

Э.И. Заварицкая, Е.Г. Сокол

При освещении светом с длинами волн $\lambda \lesssim 1,6$ мкм возникают значительные фотоэдс, направленные вдоль поверхностей германия, полученных расколом кристаллов в жидком гелии и отогревом в его парах. Явление обусловлено квазидвумерной диффузией фотоносителей тока в условиях высокого градиента поверхностного сопротивления.

Поверхностная проводимость σ_s германия, сразу после скола кристаллов в жидком гелии, исчезающе мала и не проявляется на фоне их объемной проводимости $\sigma \sim 10^{-9} \Omega^{-1}$, однако, значения σ_s можно увеличить в сотни тысяч раз с помощью промежуточных отжигов в парах He при $T_i \lesssim 40$ К^{1,2}. Это увеличение σ_s , очевидно, связано с адсорбцией примесей, поскольку в условиях, когда адсорбция исключена, например, после высокотемпературного отжига в вакуумном контейнере при давлении $p \lesssim 10^{-12}$ торр, величина σ_s остается ничтожно малой³. Но после отжига в парах He (как видно из вставки к рис. 1), величина σ_s растет крайне резко и в очень узком диапазоне T . Это наводит на мысль, что $M-D$ -переход на поверхности Ge имеет сложный характер и что имеются процессы, которые наряду с адсорбцией вносят в него значительный вклад.

С целью изучить эти явления, в настоящей работе исследования поверхностей скола кристаллов Ge были проведены в условиях освещения их видимым и ближним инфракрасным светом.

Были изучены образцы, вырезанные из слитков германия n - и p -типа с концентрацией доноров (или акцепторов) порядка $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Торцы образцов электролитически покрывались Ni; электродами служили полосочки из индия, вплавленные вдоль боковых граней. Свежие поверхности получались расколом кристаллов в жидком гелии, размеры образцов были $\sim 1 \times 4 \times 10 \text{ мм}^3$, а площадь свежей поверхности $1 \times 8 \text{ мм}^2$. После скола, перед вновь образованной поверхностью, размещалась диафрагма с щелью $0,5 \times 1 \text{ мм}^2$ и проводилось сканирование поверхности монохроматическим светом с длиной волны $0,8 \leq \lambda \leq 1,8$ мкм и с интенсивностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

В процессе отжига образец и нагреватели помещались в газообразном гелии при $T \approx 5$ К. За время $t = 2 \div 3$ мин температура образца повышалась до некоторой T_i , а затем поддерживалась на заданном уровне в течение 1 мин. От отжига к отжигу значения T_i увеличивались, и эта процедура "кратковременных" отжигов дала зависимость $\sigma_s(4,2 \text{ К}) = f(T_i)$, представленную на вставке к рис. 1. После каждого отжига при $T = 4,2$ К измерялись вольт-амперные характеристики (в темноте и при освещении) и было обнаружено, что:

1) на свежесколотых поверхностях фотоэдс отсутствуют, а токи короткого замыкания $j_k \ll \ll 10^{-9}$ А при освещении гладких участков поверхности, которые не имеют заметных дефектов скола и в достаточной мере удалены от контактов. Этот результат не изменяется и после промежуточных отжигов при температурах T_i , меньших 30 К.

2) При дальнейшем возрастании T_i на поверхности Ge при освещении возникают и быстро нарастают фототоки J_k . Рост этих токов в области $31 \leq T_i \leq 34$ К сопровождается ростом напряжений V_ϕ , с помощью которых эти токи можно скомпенсировать до нуля. Так после отжигов при T_i , равных ~ 31 К, ~ 32 К и ~ 33 К, токи J_k последовательно принимают значения $\sim 0,2 \cdot 10^{-9}$ А, $\sim 1 \cdot 10^{-9}$ А, $\sim 6 \cdot 10^{-9}$ А, а напряжения V_ϕ , соответственно, ~ 20 мВ, ~ 50 мВ, ~ 180 мВ. Видно, что промежуточный отжиг приводит к существенным изменениям свойств поверхности Ge, даже в той области T_i , в которой "темновые" характеристики образцов не отличаются от полученных сразу после скола.

3) После отжигов в интервале $34 \leq T_i \leq 38$ К поверхность скола Ge претерпевает резкий переход диэлектрик – металл, сопровождающийся ростом σ_s на 4 ÷ 5 порядков. При подсвете

ке любого участка поверхности Ge в этих условиях обнаруживаются значительные фототоки J_k , достигающие величины $\sim 10^{-7}$ А.

В самом начале этого интервала, при $T_i = 34$ К, сохраняется пропорциональность между величинами J_k и V_ϕ , характерная для условий отжига в области $T_i < 34$ К: при этом значениям $J_k \approx 10^{-7}$ А соответствуют величины $V_\phi \approx 500$ мВ. Далее, в процессе перехода поверхности из диэлектрического в металлическое состояние, величины V_ϕ сильно уменьшаются, заполняя, по мере роста σ_s , интервал $500 \div 0,2$ мВ, в то время как фототоки J_k , по порядку величины, остаются неизменными. Типичные $J - V$ кривые, измеренные в области $34 \leq T_i \leq 38$ К при освещении светом с длиной $\lambda = 1,2$ мкм приведены на рис. 1. Цифры на $J - V$ кривых показывают число промежуточных отжигов и их последовательность; те же цифры на вставке отмечают значения σ_s , измеренные после каждого отжига, в отсутствие освещения. Из рис. 1 видно, что по мере роста σ_s значения V_ϕ уменьшаются, а начиная с отжига № 6 они становятся настолько малыми, что соответствующие им $J - V$ кривые сливаются с осью ординат.

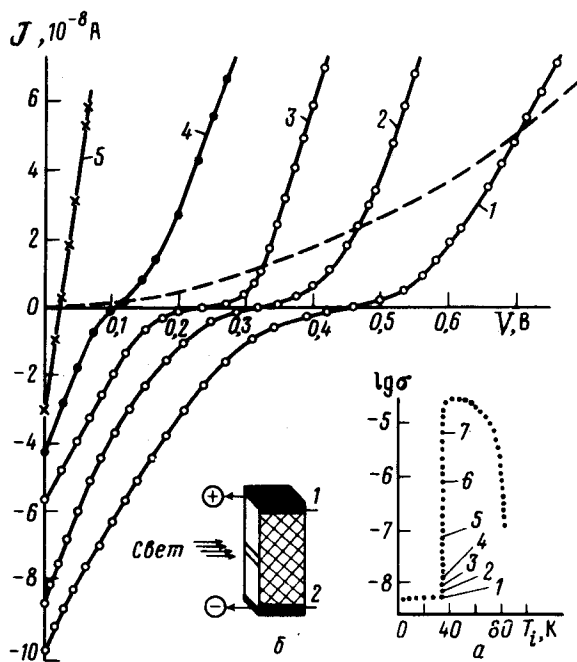


Рис. 1. $J - V$ кривые, измеренные при $T = 4,2$ К при освещении светом с длиной волны $\lambda = 1,2$ мкм поверхности раскола кристалла p -Ge. Штриховая линия относится к свежесколотой поверхности, остальные — к отожженным в парах He при температуре T_i : 1 — 34 К; 2 — 34,5 К; 3 — 35 К; 4 — 35,5 К; 5 — 36 К; 6 — 36,5 К; 7 — 37 К. На вставке а: поверхностная проводимость σ_s (при $T = 4,2$ К, в отсутствие освещения) в зависимости от температуры T_i . На вставке б: вид образца после раскола кристалла; свежая поверхность — не заштрихована; отмечено расположение светового пятна и электродов (1 ÷ 2)

В этой области T_i можно отметить еще одну особенность: когда величина σ_s , возрастая приближается к значению минимальной металлической проводимости в двумерной среде, $\sigma_{min} \approx e^2/h$, фототок J_k изменяет направление, а напряжение V_ϕ — меняет знак.

И, наконец, генерируемые светом токи и ЭДС на отожженных поверхностях Ge имеют значительную величину не только при $\lambda = 1,2$ мкм, но почти во всем диапазоне собственного поглощения света в кристаллах Ge. Как видно из данных, приведенных на рис. 2, фототоки возникают у самого края непрямых переходов, и плавно возрастая, достигают максимума вблизи $\lambda = 1,4$ мкм, где доминирующую роль играют процессы прямого поглощения света.

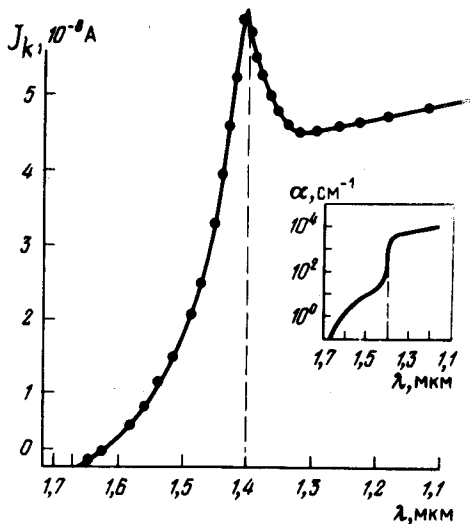


Рис. 2. Зависимость фототока J_k от длины волны падающего света, (ток измерен после одного из промежуточных отжигов поверхности). На вставке: зависимость коэффициента поглощения α от длины волны света, λ

Как известно, полный ток при освещении

$$J_k = \sigma(E + E^*) = \sigma E + e \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right), \quad (1)$$

где σ — полная проводимость, E — внешнее поле, E^* — поле "сторонних" сил, возникающих под действием фотогенерации и диффузии носителей, D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок, n и p — их концентрация. И, естественно, что при освещении неоднородных проводников возникают не равные нулю фототоки $J_k \sim e \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$ и фотоэдс $V_\Phi \sim J_k / \sigma$.

Полученные в наших опытах значения $J_k \ll 10^{-9}$ А при освещении свежесколотых кристаллов Ge свидетельствуют об однородности не только поверхностей скола, но и объема кристалла, где генерируются светом, а затем диффундируют носители тока. Однородность кристаллов, со очевидностью, сохраняется и после их нагревов в парах гелия. Следовательно, обнаруженные в наших опытах значительные фотоэффекты (токи $J_k \sim 10^{-7}$ А и ЭДС $V_\Phi \sim 500$ мВ), связаны со свойствами "отогретых" поверхностей и вызываются процессами, имеющими двумерный или квазидвумерный характер. В последнем убеждает, в частности, и тот факт, что зависимость фотоэдс от величины поверхностной проводимости имеет вид $V_\Phi \sim J_k / \sigma_s$, характерный для условий двумерной диффузии. (Значения V_Φ , как уже упоминалось, уменьшались от 500 до 0,2 мВ, по мере того, как величина σ_s в процессе отогревов возрастала в интервале $2 \cdot 10^{-8} \leq \sigma_s \leq 5 \cdot 10^{-5}$, Ω^{-1}).

Найденный нами эффект является двумерным аналогом явления, связанного с именами Пашкарева и Тауца,⁴ и заключается в появлении так называемой "распределенной" фотоэдс при освещении проводника с неравномерным распределением сопротивления (в нашем случае — поверхностного). Этот эффект может быть использован для исследования степени однородности поверхностей. Так, наши опыты показывают, что резкий (кратковременный) нагрев поверхностей в парах гелия приводит к появлению значительных неоднородностей и связанных с ними высоких значений фототоков, $J_k \sim 10^{-7}$ А. В тех же случаях, когда нагрев был однородным и продолжительным. (порядка нескольких часов при меньших T_i), значения J_k удавалось снизить в 20 — 50 раз.

Полученные в работе данные подтверждают предположение³, что рост σ_s после отжигов в парах He связан с адсорбцией газообразных примесей. Их концентрация при низких T падает в десятки раз при понижении T на градус; поэтому адсорбция примесей в условиях нестационарного нагрева имеет неоднородный характер, и отогрев поверхности в этих условиях приводит к значительным неоднородностям в распределении адсорбированных примесей и связанных с ними дырок в проводящих приповерхностных слоях.

Спектральные исследования (рис. 2), показывают, что значительные фототоки и ЭДС возникают при освещении светом с длинами волн $\lambda \lesssim 1,6$ мкм, которые обычно вызывают объемное возбуждение кристаллов Ge. Из этих данных следует, что "активированная отжигом" поверхность германия приобретает способность удерживать фотоносители тока в тонких приповерхностных слоях. Этот интересный результат требует дальнейших экспериментов и теоретического анализа.

Авторы выражают благодарность Л.В.Келдышу и Н.А.Пенину за интерес к работе и полезные дискуссии, Л.И.Падучих — за помощь в эксперименте.

Литература

1. Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Сокол Е.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 517.
2. Осипьян Ю.А., Тальянский В.И., Харламов А.А. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 253.
3. Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Заварицкий В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 371.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиков С.Г. "Физика полупроводников", М: Наука, 1977 с. 351.

Физический институт им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступила в редакцию

14 марта 1986 г.