

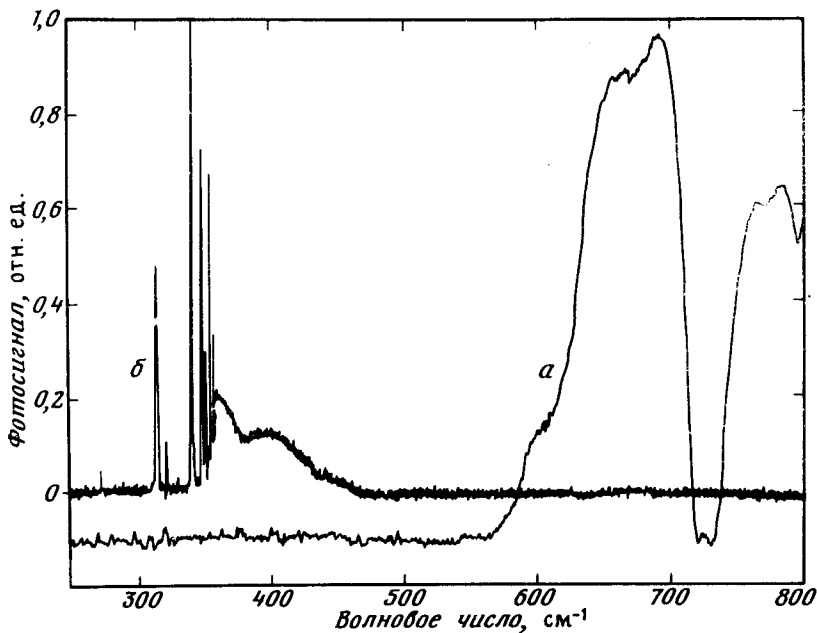
## ОБРАЩЕНИЕ ТИПА ПРИМЕСНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ЛЕГИРОВАННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

*Б.А.Андреев, Г.И.Воронкова, В.Б.Иконников,  
Т.М.Лифшиц, В.Б.Шмагин*

В легированном кремнии *p*-типа подсветка излучением из фундаментальной полосы поглощения приводит к исчезновению примесной фотопроводимости от основной примеси и возгоранию таковой от малых количеств остаточных донорных примесей.

Облучение полупроводника светом из фундаментальной полосы поглощения (“подсветка”) при низкой температуре приводит к оптической перезарядке примесей и возникновению примесной фотопроводимости, обусловленной присутствием, помимо основной, также и компенсирующих примесей<sup>1</sup>. В чистых и слабо легированных кристаллах кремния и германия

отношение величин фотопроводимости, отвечающих компенсирующей ( $\Delta\sigma_{\text{комп}}$ ) и основной ( $\Delta\sigma_{\text{осн}}$ ) примесям (обычно оно измеряется по отношению амплитуд выбранной пары линий в линейчатых участках спектра фотопроводимости, связанных с фототермической ионизацией примесей) с ростом интенсивности подсветки сначала растет, а затем достигает насыщения на уровне  $\Delta\sigma_{\text{комп}}/\Delta\sigma_{\text{осн}} < 10^{-3}$ . Иными словами, во всех известных экспериментах в перезаряженном полупроводнике преобладающей остается примесная фотопроводимость, создаваемая той примесью, которой в кристалле больше. В настоящем сообщении излагаются эксперименты с прямо противоположным результатом: в кристалле, легированном до высокой концентрации примеси, отвечающая ей фотопроводимость при включении подсветки полностью исчезает и возникает фотопроводимость только от компенсирующей примеси, содержащейся в образце в весьма малых количествах.



Эксперименты проводились на образцах кремния, легированного галлием или бором в концентрации  $(2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация компенсирующих примесей, определенная по температурной зависимости коэффициента Холла лежала в пределах  $5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5}$  от концентрации основной примеси. Измерения проводились на фурье-спектрометре по общепринятой методике или бесконтактным способом<sup>4</sup>. Излучение подсветки от осветителя с лампой накаливания максимальной мощности 20 Вт и угловой апертурой  $35^\circ$  подводилось к образцу через фильтр из KRS-6 и полый световод из нержавеющей трубки длиной 1 м. На рисунке представлены спектры фотопроводимости одного из образцов Si : Ga ( $N_{\text{Ga}} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{комп}} = 1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), измеренные без — (a) и при наличии (б) подсветки. Видно, что в отсутствие подсветки спектр примесной фотопроводимости имеет характерный для примеси Ga в Si вид (провал в области  $725 \text{ см}^{-1}$  в спектре a и при  $380 \text{ см}^{-1}$  в спектре б отражает, соответственно, отсутствие или уменьшение энергии в выходном пучке спектрометра на этих частотах). Линии фототермической ионизации Ga можно четко выявить, увеличивая масштаб краевой части спектра. При включении подсветки и увеличении ее интенсивности наблюдалось постепенное возгорание примесной фотопроводимости в области  $\sim 280 - 480 \text{ см}^{-1}$  с узкими и интенсивными линиями фототермической ионизации, отвечающими примеси фосфора (в некоторых образцах — также сурьмы и мышьяка). При этом, спектр фотопроводимости, обусловленной основной примесью (которой во многом раз больше!) постепенно уменьшался относительно спектра компенсирующей примеси и при максимальной подсветке исчезал вовсе (кривая б). Форма спектра компенсирующей примеси, положение, высота и ширина линий в нем такие же, как в чистых образцах.

Мы объясняем наблюдающееся явление возникновением при подсветке резкой асимметрии времен жизни дырок и электронов. При включении подсветки при использованной в экспериментах температуре (14 – 17 К) подавляющая часть электронов и дырок образует экситоны (энергия связи носителей в них 14 мэВ). Последние прилипают к нейтральным атомам основной примеси (которых много) и рекомбинируют на них посредством сже-процесса, в результате чего образуются свободные дырки и отрицательно заряженные акцепторы  $N_a^-$ , так что концентрация  $N_a^-$  при подсветке не уменьшается, а может даже увеличиться. В конечном счете дырки рекомбинируют с пустыми акцепторами либо непосредственно, либо через захват нейтральными атомами примеси (образование  $A^+$ -центров), перемещение по ним к  $N_a^-$  и рекомбинацию в парах  $N_a^+ - N_a^-$ . Последний процесс в наших условиях весьма эффективен и может привести к очень сильному уменьшению времени жизни дырок<sup>5,6</sup>. При концентрации акцепторов  $(2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  энергия связи дырки на нейтральном акцепторе  $\epsilon_a^+$  должна быть велика ( $\sim 10 \text{ мэВ}$ <sup>7</sup>). Для образца, спектр которого изображен на рисунке, мы определили ее непосредственно из спектра фотоионизации  $A^+$ -центров, измеренного при 6 К. Она оказалась равной  $\epsilon_a^+ = 8,2 \text{ мэВ}$ . С другой стороны, количество заряженных (не нейтрализованных подсветкой) доноров весьма мало (малая доля от малой концентрации) тем более, что коэффициент захвата экситонов нейтральными донорами существенно меньше, чем аналогичный коэффициент для акцепторов<sup>8,9</sup>. Поэтому степень перезарядки доноров при подсветке близка к единице и время жизни электронов велико.

Таким образом, включение подсветки из области фундаментального поглощения в использованных нами образцах приводит к практически полной нейтрализации компенсирующих примесей (доноров) и резкому увеличению времени жизни неосновных носителей, а также, соответственно этому, к большой величине примесной донорной фотопроводимости. В то же время, такая подсветка не только не уменьшает, а наоборот, увеличивает количество центров захвата  $N_a^-$  для дырок и, за счет возникновения  $A^+$ -центров, создает дополнительный эффективный канал рекомбинации дырок, что резко уменьшает величину фотопроводимости, связанной с фотоионизацией акцепторов.

Расчет, проведенный на основе уравнений кинетики для стационарной подсветки, в котором учтены оптические, термические и межпримесные переходы и использованы известные из литературы параметры таких переходов, качественно подтвердил описанную картину.

#### Литература

1. Быкова Е.М., Лифшиц Т.М., Сидоров В.И. ФТП, 1973, 7, 986.
2. Skolnick M.S., Eaves L., Stradling R.A., Portal J.C., Askenazy S. Solid. State Comm., 1974, 15, 1403.
3. Darken L.S., Hyder S.A. Appl. Phys. Lett., 1983, 42, 731.
4. Андреев Б.А., Герштейн Л.И., Иконников В.Б., Шмагин В.Б. ПТЭ, 1985, № 3, 172.
5. Рабинович Р.И. ЖЭТФ, 1985, 88, 1718.
6. Ворожцова Л.А., Гершензон Е.М., Гуревич Ю.А., Исмаилова Ф.М., Мельников А.П., Рабинович Р.И. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 480.
7. Александров В.Н., Гершензон Е.М., Мельников А.П., Серебрякова Н.А. ФТП, 1977, 11, 532.
8. Гершензон Е.М., Ладыжский Ю.П., Мельников А.П. ФТП, 1977, 11, 1100.
9. Cuthbert J.D. Journ. Appl. Phys., 1971, 42, 747.