

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫМИ КАПЛЯМИ В Ge И Si

Б. М. Ашхинадзе, В. В. Рождественский

При низких температурах в полупроводниках неравновесные электроны и дырки связываются в экситоны, причем доля экситонов увеличивается с ростом концентрации пар и с понижением температуры. При некоторой плотности экситонов $n_{\text{кр}}(T)$ и достаточно низких температурах возможно слипание экситонов в капли и их металлизация [1, 2].

Образование металлических капель из экситонов должно сопровождаться рядом эффектов, вызванных возникновением в образце областей с высокой проводимостью.

Для изучения явления образования электронно-дырочных капель в полупроводниках мы исследовали поглощение СВЧ излучения 8-миллиметрового диапазона длин волн в образцах Ge и Si¹⁾. Образцы, толщиной 20–100 мк помешались в волновод, перпендикулярно его широкой стенке в максимуме электрического поля волны, и облучались импульсом света лазера с длительностью $5 \cdot 10^{-8}$ сек через отверстие в узкой стенке. Измерения проводились в широком интервале температур 2,2–300°К. Сопротивление образцов Ge и Si при 300°К было 40 и 100 ом·см соответственно. Регистрировались изменения амплитуды прошедшего и отраженного СВЧ сигналов, вызванные воздействием на кристаллы света лазера.

На рис. 1 показаны осциллограммы прошедшего СВЧ сигнала для образцов Ge при 2,2°К. При малых накачках импульс ослабления повторяет форму импульса возбуждающего света. В этом случае свободные носители существуют лишь во время действия импульса света, а затем они быстро связываются в экситоны, и поглощение СВЧ излучения отсутствует.

При интенсивности света лазера, превышающей $\sim 10^{22} \text{ кв/см}^2 \cdot \text{сек}$, возникает ряд нерегулярных острых всплесков ослабления после окончания импульса света. Число, длительность, амплитуды этих импульсов сильно флуктуируют. С ростом накачки ослабление увеличивается и отдельные импульсы сливаются, образуя длинный импульс (рис. 1).

¹⁾ Исследования фотопроводимости на постоянном токе не дают возможности проследить за процессом каплеобразования, так как проводимость будет зарегистрирована лишь когда капли уже заполнят весь образец, и в этот момент будет наблюдаться скачок фототока [3, 4]. Изучение поглощения ИК света с $\hbar\omega > E_x$ (E_x – энергия связи в экситон) не позволяет отличить свободные электронно-дырочные пары от экситонов из-за того, что сечения поглощения ИК света в обоих случаях одинаковы [5].

При $4,2^{\circ}\text{K}$ картина становится менее отчетливой (рис. 2, а), так как с ростом накачки у импульса ослабления появляется медленная составляющая, на фоне которой возникают нерегулярные всплески. Доля медленной составляющей растет с накачкой. В Si (рис. 2, б) при $4,2$ и $2,2^{\circ}\text{K}$ также с ростом накачки возникает медленная составляющая. Рассмотренная картина имеет место в Ge до температур $\sim 8^{\circ}\text{K}$, а в Si до $\sim 15^{\circ}\text{K}$.

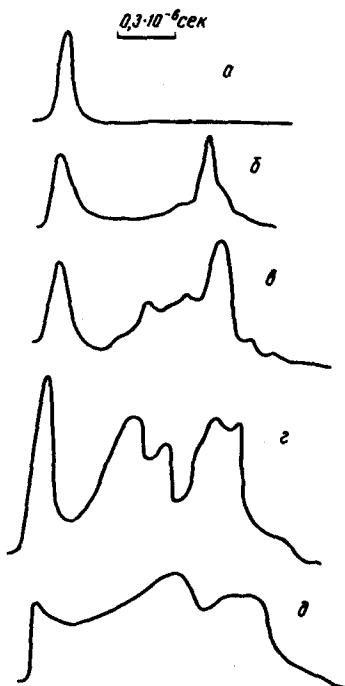


Рис. 1. Осциллограммы импульсов ослабления СВЧ излучения в образце Ge при $2,2^{\circ}\text{K}$. Масштаб по оси ординат произвольный. Интенсивность света накачки возрастает от *а* к *д*.

При более высоких температурах импульсы ослабления становятся гладкими, причем амплитуда и длительность их увеличивается. В этом случае основная доля созданных светом пар не связывается в Экситоны, и поэтому импульс ослабления СВЧ излучения отражает процесс вымирания электронно-дырочных пар. По спаду сигнала при $T > 30^{\circ}\text{K}$ оценивалось время жизни в исследованных образцах, оказавшееся $\sim 1 \text{ мксек}$.

Следует отметить, что всегда относительное увеличение амплитуды отраженного сигнала, возникающее при освещении образца, было существенно меньше ослабления СВЧ сигнала, прошедшего через образец. Поэтому наблюдавшееся на опыте ослабление СВЧ мощности происходит вследствие поглощения энергии электромагнитной волны в электронно-дырочной плазме.

При $T > 15^{\circ}\text{K}$ имеет место равномерное поглощение во всей освещенной части образца, и осциллограммы прошедшего СВЧ сигнала являются гладкими (рис. 3). Они показывают, как изменяется проводимость в электронно-дырочной плазме в германии по мере роста плотности частиц при 77°K . Увеличение длительности и тенденция к насы-

шению амплитуды импульса поглощения обусловлено процессом электронно-дырочного рассеяния.

При более низких температурах поглощение, возникающее по окончании импульса лазера, по-видимому, происходит в отдельных областях освещенной части кристалла — каплях, поскольку, как следует из осциллограмм (рис. 1), поглощение имеет дискретный характер по амплитуде и во времени. А именно, поглощение СВЧ сигнала, наблюдавшееся по окончании импульса света, всегда превышало величину, составлявшую 5% от падающей на кристалл СВЧ мощности. Флуктуационный характер импульсов поглощения, а также наличие резких всплесков указывает на то, что проводимость возникает и исчезает в каплях скачком. Эти капли хаотически двигаются по кристаллу, экранируя друг друга и сливаясь в более крупные капли¹⁾.

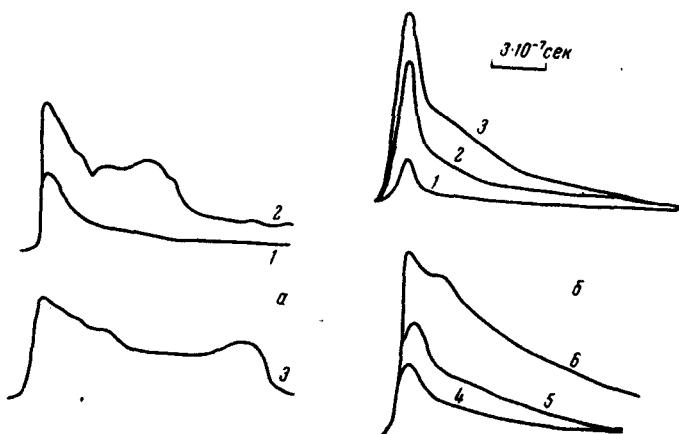


Рис. 2. Осциллограммы импульсов ослабления при $4,2^{\circ}\text{K}$:
 а — образец Ge, б — образец Si. Интенсивность света накачки возрастает от 1 к 6

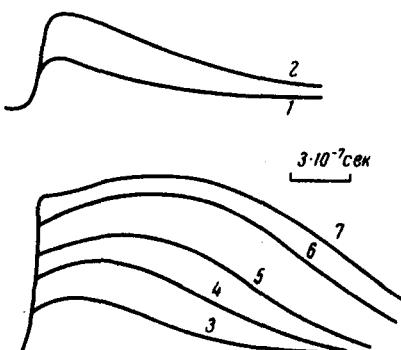


Рис. 3. Осциллограммы импульсов ослабления в образце при 77°K . Интенсивность света накачки возрастает от 1 к 7

¹⁾ Нам кажется, что и медленная составляющая импульса поглощения наблюдавшаяся в Ge и Si при низких температурах также отражает процесс поглощения в каплях.

Наличие самого факта поглощения в каплях и сопоставление величины поглощения с поглощением в электронно-дырочной плазме при высоких температурах, по-видимому, указывает, что в каплях величина $\omega\tau < 1$. При $\omega = 2 \cdot 10^{11} \text{ сек}^{-1}$ это дает $\tau < 5 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$, и приводит к величине подвижности носителей в каплях $\mu \lesssim 10^4 \text{ см}^2/\text{сек}\cdot\text{в}$. Если толщина скин-слоя, составляющая при $\sigma \sim 100 (\text{ом}\cdot\text{см})^{-1}$ величину $\sim 10 \text{ мк}$, превышает размеры капель, то в этих условиях можно оценить поглощение СВЧ излучения в одной капле:

$$\frac{P_{\text{погл}}}{P_{\text{пад}}} = \frac{\sigma E^2}{P_{\text{пад}}} V_K \approx 10^4 \sigma V_K,$$

где V_K – объем капли. Для $\sigma \sim 100 (\text{ом}\cdot\text{см})^{-1}$ и $V_K \sim 10^{-9} \text{ см}^3$ получим $P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}} \sim 10^{-3}$. В эксперименте поглощение в каплях возникает на уровне $P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}} \sim 5 \cdot 10^{-2}$. Это, по-видимому, свидетельствует об одновременном образовании большого числа капель, порядка 100.

Авторы благодарят В.Е.Голанта, С.М.Рывкина и И.Д.Ярошецкого за полезное обсуждение работы, а также Ф.Султанова и Ю.Амирова за помощь в экспериментах.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
14 февраля 1972 г.

Литература

- [1] Экситоны в полупроводниках . М., Изд.Наука, 1971.
- [2] В.М.Асинин, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 9, 415, 1969.
- [3] В.М.Асинин, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 14, 494, 1971; 7, 464, 1968.
- [4] Б.М.Ашкинадзе, И.П.Крецу, С.М.Рывкин, И.Д.Ярошецкий. ЖЭТФ, 58, 507, 1970.
- [5] Б.М.Ашкинадзе, И.П.Крецу, А.А.Патрин, И.Д.Ярошецкий. Phys. Stat. Solidi , 46, 495, 1971.