

**МИКРОВОЛНОВОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ  
В СЛОЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ЖИДКОСТИ  
НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА ГЕРМАНИЯ**

*Б.М.Ашканиадзе, В.В.Бельков*

Обнаружено поглощение СВЧ излучения, возникающее при выходе капель на поверхность кристалла. Показано, что эффект связан с образованием слоя электронно-дырочной жидкости на поверхности, который, в отличие от ЭДК, сильно поглощает микроволновое излучение.

В работе [1] был обнаружен удивительный эффект — появление больших по величине и сильно флюктуирующих всплесков СВЧ поглощения, следующих в течение некоторого периода времени после освещения кристаллов германия достаточно мощным световым импульсом при температурах ниже 6 К. Поскольку в подобных экспериментальных услови-

ях происходит конденсация экситонов в капли электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), естественно было связывать обнаруженные аномалии в поглощении с появлением в образце электронно-дырочных капель (ЭДК).

Однако эффект "аномальной" СВЧ проводимости трудно было объяснить микроволновым поглощением в обычных каплях [2–4], так как сечение поглощения ЭДК весьма мало. Было высказано предположение, что при высоких накачках пороговым образом возникают области плотной плазмы. Значительное поглощение микроволны связывалось с малым временем релаксации импульса носителей в этих областях ( $\tau_c \sim 10^{-12}$  сек) [1, 4, 5]. Природа появления таких областей оставалась неясной.

В настоящей работе выяснена природа "аномального" СВЧ поглощения и показано, что оно обусловлено образованием при определенных условиях "лужиц" – слоя ЭДЖ на поверхности кристалла.

При образовании слоя СВЧ поглощение электронно-дырочной жидкостью должно резко увеличиться. Дело в том, что малость микроволнового электродипольного поглощения каплями связана со значительным уменьшением напряженности электрического поля волны в капле и высокой подвижностью ферми-вырожденных носителей в ней [2–4]. Для слоя ЭДЖ, расположенного параллельно вектору электрического поля волны, эффект экранировки отсутствует, а сильное рассеяние носителей на поверхности резко уменьшает их подвижность [6]. Легко показать, что в случае образования сплошного слоя ЭДЖ отношение коэффициентов поглощения слоем ЭДЖ и равным ему суммарным объемом капель в кристалле имеет вид

$$\frac{a_e}{a_{\text{ЭДК}}} = \frac{1}{9} \frac{\omega_p^4}{\omega^4} \frac{\omega^2 \tau_c \tau_k}{1 + \omega^2 \tau_c^2} \quad (1)$$

$\omega_p = 2 \cdot 10^{13}$  сек $^{-1}$  – плазменная частота носителей в ЭДЖ,  $\tau_k$  и  $\tau_c$  – времена релаксации импульса носителей в ЭДК и поверхностной ЭДЖ, соответственно;  $\omega = 2,3 \cdot 10^{11}$  сек $^{-1}$  – частота СВЧ излучения. Для носителей в ЭДК  $\tau_k \approx 10^{-10}$  сек и  $\omega \tau_k \gg 1$ ; величина  $\tau_c$  определяется рассеянием на поверхности и не превышает значения  $\frac{\omega}{v_F} \lesssim 10^{-11}$  сек ( $\omega$  – толщина слоя ЭДЖ, порядка и меньше радиуса капель ( $10^{-4}$  см);  $v_F$  – фермиевская скорость носителей в ЭДК). Из (1) следует, что величина поглощенной СВЧ мощности слоем может возрасти в  $\sim 10^8$  раз по сравнению с поглощением каплями. Таким образом, образование слоя ЭДЖ должно отчетливо проявляться в резком увеличении сигнала СВЧ поглощения.

Слой ЭДЖ создавался при выносе капель на поверхность кристалла потоком длинноволновых баллистических фононов, получаемых техникой тепловых импульсов [7, 8]. Схема эксперимента показана на вставке к рис. 2. Образцы германия ( $N_i \approx 2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ) размером  $1,5 \times 3 \times 5$  мм $^3$  помещались в волновод восьмимиллиметрового диапазона; освещаемая поверхность располагалась в центре волновода параллельно вектору поля волны. Эксперименты проводились при температуре 1,8 К.

На рис. 1 показаны осциллограммы сигналов СВЧ поглощения, наблюдавшиеся в этих условиях. В отсутствие теплового импульса (ТИ) или при его мощности, меньшей пороговой  $P^{**}$ , импульсы поглощения

имеют известный вид (рис. 1, б и г, кривые 1). При мощности ТИ, превышающей  $P^*$ , капли срываются с примесей, приходят в движение и выносятся на поверхность кристалла. Из-за малого времени жизни на поверхности интенсивность люминесценции капель резко падает [8] (рис. 1, г); сигнал циклотронного резонанса также уменьшается, поскольку количество капель, генерирующих свободные носители [3], становится меньше. При  $P > P^{**} > P^*$  появляется "аномально" большой по величине сигнал поглощения (рис. 1, б, г), обусловленный выносом капель на поверхность. Величина и форма этого сигнала мало меняются при увеличении магнитного поля до 10 кЭ.

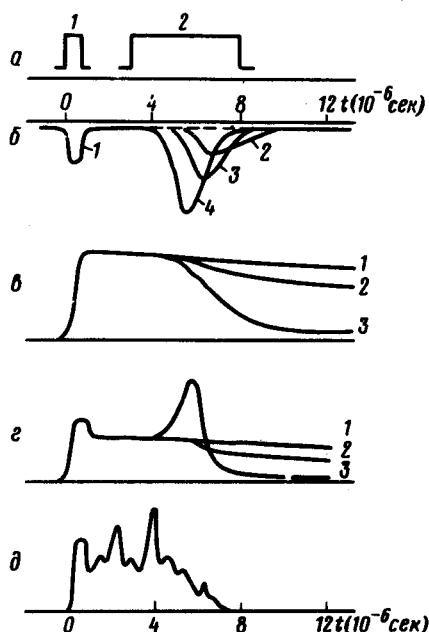


Рис. 1. Осциллограммы сигналов:  
а – импульс лазера – 1, тепловой импульс – 2; б – сигналы СВЧ поглощения при мощности теплового импульса –  $P$ : 1 – меньше, чем  $P^{**}$ ; 2 –  $1,2P^{**}$ ; 3 –  $1,4P^{**}$ ; 4 –  $1,6P^{**}$ ; в – сигналы люминесценции и г – СВЧ поглощения в условиях электронного циклотронного резонанса: 1 –  $P < P^*$ ; 2 –  $1,5P^*$ ; 3 –  $2,4P^* + 1,6P^{**}$ ; д – сигнал СВЧ поглощения при высокой накачке ( $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ )

Момент спада сигналов люминесценции и циклотронного резонанса задержан относительно начала ТИ на время  $T = T_\Phi + T_d + \tau_s$ . Здесь  $T_\Phi$  – время пробега баллистических фононов через кристалл,  $T_d$  – время,

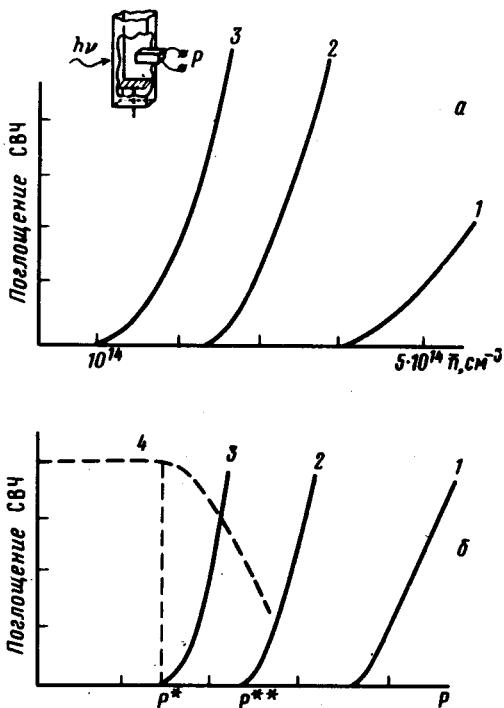


Рис. 2. Зависимости амплитуды сигнала СВЧ поглощения  
а – от плотности инъектированных пар при разных мощностях теплового импульса ( $P_1 < P_2 < P_3$ ); б – от мощности ТИ при разных накачках  $\bar{n}$  ( $\bar{n}_1 < \bar{n}_2 < \bar{n}_3$ ) кривая 4 – гашение люминесценции ЭДК

необходимое для прихода капель на поверхность,  $\tau_s \sim 5 \cdot 10^{-7}$  сек – поверхностное время жизни капель. Временная задержка импульса "аномального" поглощения оказалась зависящей от интенсивности возбуждающего света и мощности ТИ; можно было реализовать ситуацию, когда поглощение возникало практически сразу при выходе капель на поверхность, до того как интенсивность люминесценции начинала падать. Спад сигнала поглощения соответствует снижению темпа выноса ЭДК либо в результате истощения количества капель в объеме, либо при окончании воздействия фононного потока.

Было обнаружено, что эффект возникает при достижении пороговой величины плотности капель на поверхности. На рис. 2 показаны зависимости величины СВЧ поглощения, индуцированного фононным потоком, от плотности инъектированных пар –  $\bar{n}$  и от мощности ТИ. Кривые на рис. 2, а указывают на наличие порога "аномального" поглощения при изменении  $\bar{n}$ ; с ростом мощности ТИ (скорости капель) порог смещается к меньшим накачкам. С другой стороны, пороговая мощность ТИ, необходимая для появления эффекта –  $P^{**}$ , уменьшается с ростом накачки (рис. 2, б), и при  $\bar{n} \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  величина  $P^{**}$  практически совпадает с порогом  $P^*$ , определяющим условие отрыва капли от примеси.

Представленные результаты показывают, что СВЧ поглощением обусловлено существенным заполнением поверхности каплями и образованием кластеров капель – "лужиц" или слоя ЭДЖ, а не гибелю отдельных капель и образованием плазмы<sup>1)</sup>. Слой сможет образовываться, если средняя концентрация жидкой фазы, принесенной на поверхность –  $N_c$ , превысит величину  $n_0^{2/3} \approx 3,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  ( $n_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  – плотность пар в ЭДЖ). В стационарном случае  $N_c = \bar{n}v\tau_s$  [8], и формирование слоя ЭДЖ на поверхности при  $\tau_s = 5 \cdot 10^{-7}$  сек и  $v = 10^4 \text{ см/сек}$  будет возможным, начиная с  $\bar{n} > 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Величина поглощения слоем ЭДЖ при  $P \approx 2P^{**}$  обычно превышала в  $\sim 10$  раз поглощение, обусловленное оже-электронами в условиях циклотронного резонанса. Так как оже-электроны плотности  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (для  $\bar{n} \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) заполняют весь возбуждаемый объем ( $\sim 10^{-3} \text{ см}^3$ ), то в духе выражения (1) можно оценить объем слоя ЭДЖ, приводящий к наблюдаемой величине сигнала поглощения. Такая оценка дает  $\sim 10^{-7} \text{ см}^3$ , что может соответствовать кластеру толщиной  $10^{-4} \text{ см}$  с диаметром  $\sim 300 \text{ мкм}$ . Близкая оценка такого слоя ЭДЖ получается из выражения для  $N_c$ , что подтверждает правильность интерпретации наблюденного СВЧ поглощения.

В заключение отметим, что в настоящей работе слой ЭДЖ создавался с помощью внешнего потока фононов, приводившего капли в движение. Наблюдавшиеся ранее "аномалии" в поглощении при высоких накачках [1, 4, 10] (рис. 1, д) также обусловлены образованием слоя ЭДЖ.

<sup>1)</sup> Сигнал поглощения мог бы быть, в принципе, связан с появлением плотной плазмы вблизи поверхности, например, при разрыве капель в поле поверхностного изгиба зон, из-за потери термодинамической или кинетической устойчивости поверхностного слоя капель.

Действительно, порог разлета ЭДК под действием собственного фонового ветра достигается при  $\bar{n} > 10^{15}$  см<sup>-3</sup>; при этом скорость капель превышает 10<sup>3</sup> см/сек, и условия для образования слоя выполняются при разлете капель.

Малая величина  $r_c$  в поверхностной ЭДЖ определяет слабое влияние магнитного поля на величину поглощенной мощности и приводит к широкой линии магнитоплазменного резонанса в слое ЭДЖ [4].

Авторы признательны И.М.Фишману за полезные дискуссии.

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

Поступила в редакцию  
2 марта 1981 г.

## Литература

- [1] Б.М.Ашкинадзе, В.В.Рождественский. Письма в ЖЭТФ, 15, 371, 1972.
- [2] Л.В.Келдыш. Сб. "Экситоны в полупроводниках", М., изд. Наука, 1971.
- [3] Т.Райс, Дж.Хенсел, Т.Филлипс, Г.Томас. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках, М., изд. Мир, 1980.
- [4] Б.М.Ашкинадзе, П.Д.Алтухов. ФТТ, 17, 1004, 1975.
- [5] Б.М.Ашкинадзе, Н.Н.Зиновьев, И.М.Фишман. ЖЭТФ, 70, 678, 1976.
- [6] J.F.Koch. Surf. Sci., 58, 104, 1976.
- [7] J.C.Hensel, R.C.Dynes. Phys. Rev. Lett., 39, 969, 1977.
- [8] В.М.Аснин, Б.М.Ашкинадзе, Н.И.Саблина, В.И.Степанов. Письма в ЖЭТФ, 30, 495, 1979; ФТТ, 22, 2063, 1980.