

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ КАПЛИ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ
В Ge ПРИ ВЫСОКОМ УРОВНЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Б. М. Ашкинадзе, И. М. Фишман

При высоком уровне возбуждения германия обнаружено появление областей плотной электронно-дырочной плазмы, при этом возникает быстрая кинетика спада в рекомбинационном излучении электронно-дырочных капель. Эти результаты объясняются как следствие эффекта разлета капель при достижении некоторой пороговой величины уровня возбуждения, когда кинетическая энергия быстро движущихся капель оказывается достаточной для того, чтобы при неупругом ударе капля взорвалась, и возник сгусток плотной плазмы.

В работах [1, 2] при исследовании СВЧ проводимости оптически возбужденного германия при $T \leq 4,2\text{ К}$ было обнаружено, что при достаточно большой накачке в образце появляются области, занятые сгустками плотной электронно-дырочной плазмы. Свойства этих плазменных сгустков, и прежде всего их плотность, оказались существенно отличными от свойств электронно-дырочных капель (ЭДК). Было высказано предположение, что при стационарном возбуждении сгустки плотной плазмы могут возникать в результате фазового перехода в плотном газе электронов и дырок, существующем вблизи поверхности образца. Здесь мы приведем результаты исследования кинетики плотной плазмы и рекомбинационного излучения ЭДК, которые свидетельствуют о том, что для появления плазменных сгустков в образце необходимо создать достаточно большое количество конденсированной фазы; тем самым процесс, приводящий к образованию плотной плазмы, является, по-видимому, иным, чем предполагалось в [2].

Методика эксперимента описана в [2, 3]. Образец германия помещался в волновод СВЧ тракта 8-миллиметрового диапазона. Импульсное возбуждение осуществлялось GaAs-лазером мощностью 10 Вт при длительности импульса от 0,2 до 10 мксек. Был использован гомодинарный СВЧ спектрометр, что позволяло раздельно регистрировать сигналы поглощения и дисперсии.

Осциллограммы сигналов рекомбинационного излучения ЭДК, СВЧ поглощения и дисперсии, соответствующие двум уровням возбуждения, показаны на рис. 1. При интенсивности накачки I , меньшей, чем некоторая пороговая величина $I_{\text{п}}$, импульс излучения экспоненциально затухает с $\tau_0 \sim 35$ мксек; после окончания импульса возбуждения поглощение СВЧ отсутствует. В сигнале дисперсии имеется положительная составляющая, которая также спадает с $\tau_0 \sim 35$ мксек; эта составляющая обусловлена наличием в образце ЭДК [2], причем амплитуда сигнала пропорциональна объему жидкой фазы. При $I > I_{\text{п}}$ возникает значительное, сильно флуктуирующее во времени СВЧ поглощение, имеющее вид нерегулярных резких пиков длительностью ~ 50 нсек (длительность отдельного пика определяется временным разрешением аппаратуры); сигнал дисперсии также резко растет и флуктуирует. В

этой же области накачек постепенно деформируется импульс рекомбинационного излучения; возникает быстрая компонента, означающая, что большая часть капель исчезает гораздо быстрее, чем при малой накачке¹⁾ [3].

Исследование СВЧ проводимости при $I > I_{\text{п}}$ [3] приводит к выводу, что эта проводимость обусловлена возникновением в образце локализованных в пространстве сгустков плазмы, имеющей плотность $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для выяснения вопроса, как возникают плазменные сгустки (определяется ли порог их появления темпом генерации или полным числом неравновесных носителей), мы исследовали зависимость этого порога от условий возбуждения.

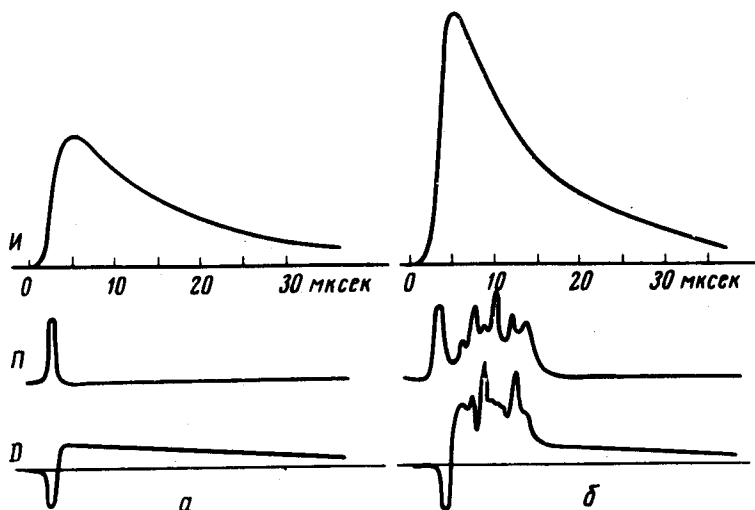


Рис. 1. Осциллограммы сигналов рекомбинационного излучения (I), поглощения СВЧ излучения (Π) и дисперсии СВЧ волны (D) при двух интенсивностях возбуждения (в отн. ед.): $a - 10$; $b - 20$

Изменяя амплитуду или длительность, а также возбуждая образец пилообразным световым импульсом с фронтом нарастания $\sim 20 \text{ мксек}$, мы убедились, что для возникновения плазменных сгустков необходимо, чтобы полное число неравновесных носителей, введенных в образец, превысило некоторую критическую величину, соответствующую средней плотности по образцу $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При длинном импульсе возбуждения (рис. 2) плазма возникает в тот момент времени, когда в образце будет достигнута пороговая величина концентрации пар. Увеличение интенсивности приводит к тому, что плазма появляется раньше. Поскольку при низкой температуре почти все носители быстро

¹⁾ Спектры рекомбинационного излучения ЭДК не деформировались ни при изменении уровня возбуждения, ни при записи их с разными задержками относительно импульса накачки, и в точности соответствовали спектрам, полученным в [4]. Более подробное исследование кинетики излучения проведено в работе [3].

связываются в ЭДК, увеличение длительности импульса накачки должно приводить лишь к росту объема жидкой фазы. Таким образом, когда полный объем ЭДК достигает $\sim 1\%$ возбуждаемого объема кристалла, возникают сгустки плотной плазмы, а время жизни некоторых капель уменьшается.

Второй существенной чертой кинетики плотной плазмы является то, что при коротком, но достаточно мощном импульсе возбуждения плазма может возникнуть или сразу вслед за импульсом, или с некоторой, иногда значительной задержкой (рис. 1). Последнее может означать, что источником энергии, необходимой для возникновения плазмы, являются рекомбинационные процессы в ЭДК.

По нашему мнению, описанное выше явление следует рассматривать как следствие быстрого движения капель электронно-дырочной жидкости. Как было показано в [5], при достаточно мощном импульсном возбуждении вблизи поверхности образца возникает облако мелких ЭДК, летящих в глубину с большой начальной скоростью (необходимо заметить, что механизм разлета капель пока не ясен, хотя некоторые модели, описывающие разлет, содержатся в [6, 7]). Если принять [5], что скорость движения капель растет с ростом уровня возбуждения и достигает величины $\sim 3 \cdot 10^6$ см/сек, то кинетическая энергия, запасенная каплей, может оказаться достаточной для того, чтобы при неупругом соударении капли с поверхностью образца, дефектом либо, наконец, другой каплей, обусловить нагрев капли до $T \gtrsim T_{кр}$, где $T_{кр}$ — критическая температура конденсации¹⁾. При этом капля взорвется, и образуется сгусток плотной плазмы, который, остывая, вновь превращается в каплю.

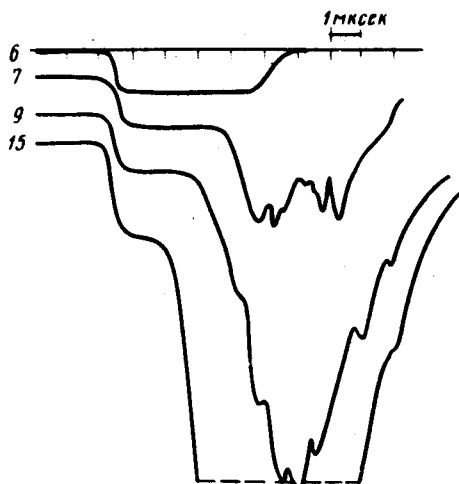


Рис. 2. Оциллограммы сигналов СВЧ поглощения при длительности импульса света лазера 5 мксек, цифры рядом с импульсами указывают интенсивность возбуждения (в отн. ед.)

В рассмотренной картине необходимо, чтобы в кристалле в течение значительного времени после окончания импульса накачки существовали капли, движущиеся с большими скоростями. Это можно объяс-

¹⁾ Заметим, что горячих "капель" с $T \lesssim T_{кр}$ в кристалле при этом будет весьма мало, так как выделение энергий в капле происходит быстро, и если капля не испарилась, то она за время $\sim 10^{-8}$ сек остынет.

нить, если предположить, что как разлет капель, так и их последующее движение в ограниченном образце обусловлены фоновым ветром [6, 8]. Действительно, порог явления понижается при ограничении размеров образца, когда появляется возможность накопления значительной концентрации быстро движущихся капель.

Таким образом, возникновение плотной плазмы в "холодном" образце можно объяснить, приняв во внимание эффект движения капель с большими скоростями; при этом вопрос о том, соответствуют ли наблюдаемые плазменные сгустки новому метастабильному фазовому состоянию системы, следует считать открытым; в работе [3] приведены некоторые аргументы в пользу этого предположения.

В заключение упомянем некоторые возможно, в принципе, механизмы появления сгустков плотной плазмы, обусловленные не ростом концентрации капель и их разлетом, а увеличением радиуса капли и достижением, по мере роста накачки, некоторого критического размера.

1. Накопление экситонов в межкапельном пространстве и плазменный фазовый переход в экситон-электронном газе при $T \ll T_{кр}$ [9]. Накопление экситонов можно связывать с ростом радиуса капли, а также с достижением предельного радиуса, определяемого фоновым ветром [8].

2. Взрыв капли, достигшей критического размера, и ее превращение в сгусток плазмы. Взрыв может быть обусловлен накоплением фоонов, испускаемых при рекомбинации.

Последние механизмы появления плотной плазмы должны сопровождаться либо деформацией спектров излучения ЭДК, либо значительным изменением радиуса капель, либо, наконец, появлением экситонов в спектре при накачке, превышающей пороговую. Однако, этих явлений не удалось обнаружить экспериментально [3, 5].

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

Поступила в редакцию
21 июля 1976 г.

Литература

- [1] Б.М.Ашкинадзе, В.В.Рождественский. Письма в ЖЭТФ, 15, 371, 1972.
- [2] Б.М.Ашкинадзе, Н.Н.Зиновьев, И.М.Фишман. ЖЭТФ, 70, 678, 1976.
- [3] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. ФТТ (в печати).
- [4] G.C.Hensel, G.A.Thomas, T.G.Phillips, T.M.Rice. Phys. Rev. Lett., 31, 386, 1973.
- [5] T.C.Damen, G.M.Worlock. Proc. III Int. Conf. on Light Scat. in Solids, Brazil, 1975, p. 183.
- [6] Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, 23, 100, 1976.
- [7] M.Combescot. Phys. Rev. B, 12, 1591, 1975.
- [8] В.С.Багаев, Л.В.Келдыш, Н.Н.Сибельдин, В.А.Цветков. ЖЭТФ, 70, 72, 1976.
- [9] W.D.Kraft, K.Kilimann, D.Kremp. Phys. Stat. Sol. (b), 72, 461, 1975.