

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК В Ge И Si СВЧ МЕТОДОМ

Б.М.Ашкенадзе, Ф.К.Султанов

В настоящее время имеется две точки зрения на процесс перехода диэлектрик – металл в системе экситонов в Ge и Si при низкой температуре. Ряд авторов считает, что уже при невысокой плотности экситонов $n_3 \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ происходит слияние экситонов в металлические капли, и именно появление капель приводит к возгоранию широкой длинноволновой линии рекомбинационного излучения [1 – 3]. С другой стороны имеется мнение, что сначала экситоны образуют биэкситоны, и они дают эту линию излучения [4], а лишь при значительной плотности биэкситонов $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ происходит их конденсация в капли [5]. При этом одним из эффективных механизмов рекомбинации биэкситонов может быть Оже-рекомбинация биэкситонов, когда аннигиляция биэкситонов сопровождается выбросом свободных электрона и дырки.

Исследование проводимости на СВЧ является наиболее прямым способом регистрации появления металлизированных областей – капель в системе экситонов. Высокая чувствительность метода также позволяла надеяться обнаружить проводимость от Оже-электронов.

Приведенные ниже экспериментальные данные, по измерению СВЧ поглощения в образцах Ge и Si, возбуждаемых светом лазера, по-видимому, свидетельствуют в пользу существования биэкситонов и их конденсации в металлические капли.

При этом возникает вопрос о поведении электронно-дырочной капли на СВЧ. Капля может или поглощать или отражать излучение СВЧ, и это зависит от ее параметров: формы, размеров и величины проводимости. Предварительные экспериментальные исследования, проведенные нами [6], показали, что капли, в основном, поглощают СВЧ излучение. Методика измерений описана в [6].

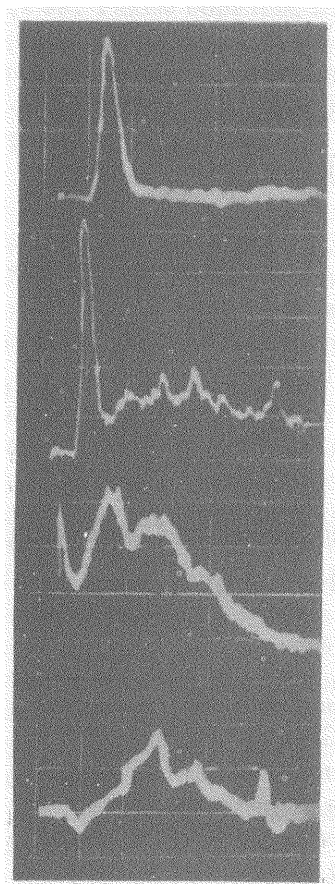


Рис. 1. Осциллограммы импульса поглощения СВЧ излучения в Ge. Накачка увеличивается сверху вниз. Масштаб времени: на первом кадре — 140 нсек/клетку; на втором, третьем и четвертом кадрах — 350 нсек/клетку

На рис. 1 показаны осциллограммы импульса поглощения при $2,5^{\circ}\text{K}$. При малых накачках этот импульс 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 отсутствует. При накачке $n \sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ¹⁾ возникает медленная составляющая проводимости, доля которой резко растет с накачкой (рис. 3,а), причем одновременно появляются резкие нерегулярные скачки в проводимости [6]. Аналогичная картина наблюдается при $T = 4,2^{\circ}\text{K}$, однако импульс имеет более гладкую форму.

1) Оценки концентрации сделаны по темпу генерации с точностью до множителя 2.

В Si картина несколько иная (рис. 3,б). Здесь также появляется медленная кинетика (рис. 2), но в этом случае ее доля плавно нарастает с накачкой. Время спада медленной кинетики значительно превышает время жизни в каплях. Однако, при еще больших накачках, резко появляется дополнительное поглощение, имеющее характерное время спада ~ 300 нсек, которое близко к измеренному в [7] времени жизни конденсированной фазы в Si ¹⁾.

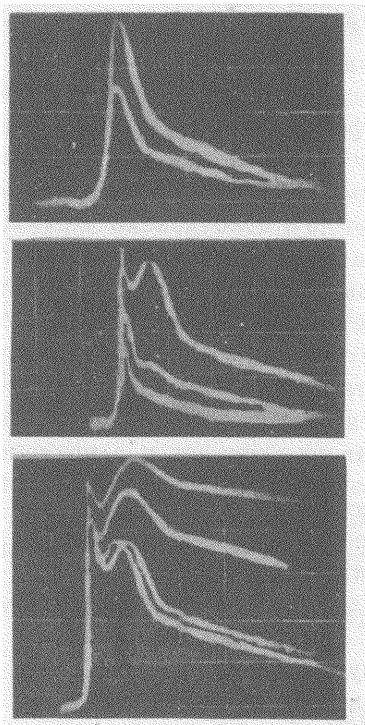


Рис. 2. Осциллограммы импульса поглощения в Si при 4,2°K. Масштаб времени: на первом кадре — 140 нсек/клетку; на втором и третьем кадрах — 350 нсек/клетку

Одновременно в тех же условиях исследовалось рекомбинационное излучение. При малых накачках $n \sim 10^{15}$ см⁻³ и в Ge и в Si наблюдалась широкая длинноволновая линия излучения [1,4,7]. Ее форма не менялась, и интенсивность излучения росла линейно с накачкой вплоть до $n \sim 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (для Ge) и $n \sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ (для Si). При больших накачках линия излучения начинала уширяться и несколько сдвигаться. По-видимому, этот момент связан с заполнением образца каплями и ростом плотности в электронно-дырочной плазме.

Таким образом, резкое пороговое возрастание СВЧ поглощения возникает при концентрациях более, чем на порядок меньших плотности частиц в каплях, а следовательно, при этом капли занимают объем не превышающий 10% возбуждаемого объема. Наличие в этих условиях крутого роста сигнала СВЧ поглощения (рис. 3) указывает на существование порога образования проводящих электронно-дырочных капель. Резкие всплески в СВЧ проводимости также свидетельствуют о

¹⁾Время жизни экситонов превышает 1 мксек [7].

начале процесса конденсации: они обязаны возникновению и гибели небольшого числа капель, так как при этом проводимость системы должна меняться скачками.

Из этих экспериментов следует, что лишь при достаточно высокой плотности начинается процесс конденсации в Ge и Si. Однако заметим, что широкая линия излучения возникает задолго до этого момента. Как показано в работах [4,5], эта линия при малых концентрациях может быть обязана рекомбинации биэкситона.

Важными свидетельствами в пользу того, что при $n < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ система состоит, в основном, из биэкситонов являются следующие факты.

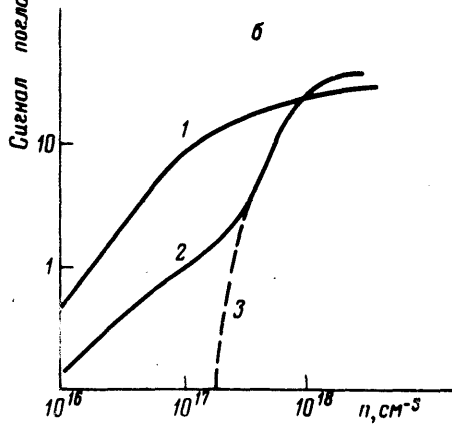
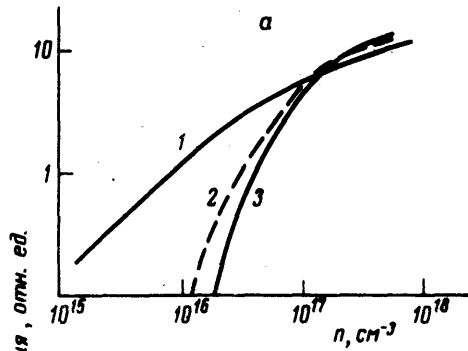


Рис. 3. Зависимость величины сигнала поглощения от средней плотности электронно-дырочных пар: а – Ge: 1 – амплитуда сигнала поглощения при $4,2^{\circ}\text{K}$; 2 – величина сигнала поглощения спустя 300 нсек после окончания импульса света при $4,2^{\circ}\text{K}$; 3 – тоже при $2,5^{\circ}\text{K}$; б – Si: 1 – амплитуда сигнала поглощения; 2 – величина сигнала поглощения спустя 300 нсек после окончания импульса света; 3 – экстраполяция участка поглощения каплями, $T = 4,2^{\circ}\text{K}$

В Ge при $4,2^{\circ}\text{K}$ и накачках $\sim 10^{14} + 10^{15} \text{ см}^{-3}$ число свободных электронно-дырочных пар имеющих в образце после выключения света не превышает порог чувствительности схемы $\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Столь малое количество свободных носителей свидетельствует о том, что они находятся в равновесии с экситонами и биэкситонами, а не только с экситонами [8].

Другим важным доказательством наличия биэкситонов, явилось обнаружение Оже-электронов, возникающих при аннигиляции биэкситонов в Si. Именно эти Оже-электроны и определяют основную медленную составляющую сигнала СВЧ поглощения в Si (рис. 2). Действительно, зависимость амплитуды этой составляющей сигнала по-

глощения от накачки, форма кривой спада поглощения, чувствительность времени спада к времени жизни экситонов в образце — хорошо описываются моделью Оже-рекомбинации биэкситонов. Отметим, что рассматриваемая картина должна быть подобна Оже-рекомбинации связанных экситонов [9], и действительно, форма наблюдаемой кривой спада проводимости подобна релаксациям проводимости Оже-электронов, исследованным в [9] на образцах сильнолегированного Si¹⁾. После достижения некоторой плотности биэкситонов они сливаются в капли. Так как такие капли живут ~300 нсек, то они вносят вклад в проводимость лишь в течение этого времени (рис. 2 и 3, б).

Таким образом, по-видимому, в Ge и Si при малых накачках экситоны связываются в биэкситоны, и в случае Si, где Оже-рекомбинация из-за более высокой эффективной плотности в биэкситоне идет значительно интенсивнее, чем в Ge, отчетливо наблюдается проводимость Оже-электронов. При довольно высоких накачках происходит слияние биэкситонов в металлические капли. Заметим, что величина средней концентрации, когда начинается процесс конденсации биэкситонов, по-видимому, должна сильно зависеть от условий эксперимента, главным образом, от характера накачки — стационарной или нестационарной. Поэтому область концентраций, где существуют, в основном, биэкситоны, может изменяться. Однако, весьма важен полученный в настоящей работе результат, что система проходит через стадию биэкситонов, и при этом линия рекомбинационного излучения биэкситонов и излучение электронно-дырочных капель спектрально не разделены.

Авторы благодарят С.М.Рывкина, В.В.Рождественского, В.М.Аснина и И.Д.Ярошецкого за полезные дискуссии.

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

Поступила в редакцию
13 июля 1972 г.

Литература

- [1] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, 9, 435, 1969.
- [2] Сб. "Экситоны в полупроводниках". М., изд. Наука, 1971.
- [3] C. Benôit à la Guillaume, M. Voos, F. Salvan. Phys. Rev., B5, 3079, 1972.
- [4] J.R. Haynes. Phys. Rev. Lett., 17, 860, 1966.
- [5] В.М.Аснин, А.А.Рогачев, Н.И.Саблина. ФТТ, 14, 399, 1972.
- [6] Б.М.Ашкинадзе, В.В.Рождественский. Письма в ЖЭТФ, 15, 371, 1972.
- [7] Б.М.Ашкинадзе, И.П.Крецу, С.М.Рывкин, И.Д.Ярошецкий. ЖЭТФ, 58, 507, 1970.
- [8] Л.В.Келдыш. Сб. "Экситоны в полупроводниках". М., изд. Наука, 1971.
- [9] J.D. Cuthbert. J. Appl. Phys., 42, 747, 1971.

¹⁾ Нами исследовались нелегированные образцы с $\rho \sim 1000 \text{ ом}\cdot\text{см}$, и в их спектре излучения наблюдалась лишь линия биэкситонов.