

## **СВЧ ПРОБОЙ ЭКСИТОНОВ В ГЕРМАНИИ**

*А. А. Мамеяков, В. А. Милеев, Г. Н. Михайлова,  
С. П. Смолин*

В последнее время проявляется большой интерес к исследованию экситонов в полупроводниках. Для экситонов в германии при  $T \lesssim 6^\circ\text{K}$  допускается возможность объединения в биэкситоны и в жидкие "капли" [1]. Экспериментально экситоны в германии исследовались методами люминесценции [2, 3], фотопроводимости на постоянном токе [4] и рассеяния света [5]. Мы предприняли исследования электрических свойств экситонов в германии на СВЧ.

Нами был обнаружен эффект теплового пробоя экситонов или их возможных образований в поле СВЧ и изучена зависимость этого эффекта от температуры, энергии световой накачки, мощности СВЧ и внешнего постоянного магнитного поля. Полученные результаты обсуждаются на основе биэкситонной и капельной моделей.

Эксперименты производились на супергетеродинном радиоспектроскопе ( $\lambda = 3,2 \text{ см}$ ) [6]. Образцы чистого германия (концентрация остаточных примесей  $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) размерами  $1,5 \times 1,5 \times 0,5 \text{ мм}^3$  помещались в отражательный резонатор с добротностью  $\sim 10^3$ . Чувствительность приемника соответствует концентрации  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  свободных носителей в исследованных образцах, временное разрешение  $\sim 0,6 \text{ мксек}$ . Оптическое возбуждение осуществлялось лазером на иттрий-алюминиевом гранате ( $\lambda = 1,06 \text{ мк}$ ) в режиме гигантских импульсов с частотой следования  $200 \text{ гц}$  и максимальной энергией  $10^{-4} \text{ Дж/импульс}$ , что соответствует максимальной концентрации генерируемых электрон-дырочных пар  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Излучение попадало на образец по кварцевому световоду, либо непосредственно через окна оптического криостата. Образец приклеивался к тонкому кварцевому стержню и мог быть расположен в различных точках резонатора, погруженного в жидкий гелий, и различно ориентирован относительно направлений электрического и магнитного СВЧ полей.

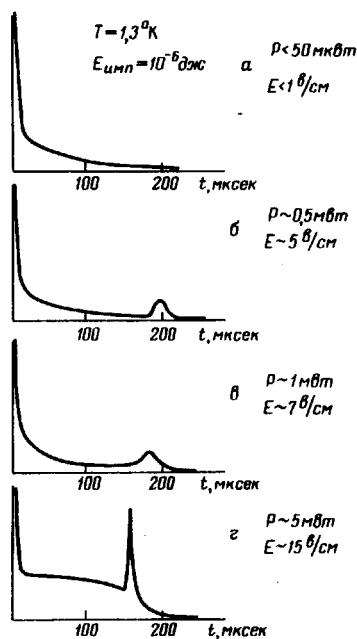


Рис. 1. Формы сигнала, полученные при разных уровнях СВЧ мощности, когда образец помещен в пучности  $E_{\text{СВЧ}}$  и  $T = 1,3^\circ\text{K}$

На экране осциллографа регистрировался сигнал отраженной мощности от резонатора СВЧ. Было выяснено, что, когда образец помещен в пучность электрического поля  $E_{\text{СВЧ}}$  в резонаторе, сигнал определяется, в основном, расстройкой резонатора, т. е. изменением действительной части диэлектрической постоянной  $\Delta \epsilon'$ . Напротив, когда образец расположен в пучности  $H_{\text{СВЧ}}$ , наблюдается сигнал поглощения, причем амплитуда сигнала в 100 раз меньше, чем в первом случае. На рис. 1 приведены формы сигнала, полученные при разных уровнях СВЧ мощности, поступающей в резонатор, для случая, когда поле  $E_{\text{СВЧ}}$  параллельно плоскости образца и  $T = 1,3^\circ\text{K}$  и  $N_{e-h} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Начало временной развертки соответствует концу возбуждающего лазерно-

го импульса. На малых уровнях СВЧ (рис. 1, а) сигнал представляет собой сумму двух экспонент с характеристическими временами 2 – 3 и 50 *мксек* соответственно. При  $P_{\text{СВЧ}} > 0,5 \text{ мвт}$  в конце длинной экспоненты наблюдается "горб" (рис. 1, б, в), который перемещается к началу развертки при увеличении мощности, и при  $P_{\text{СВЧ}} > 5 \text{ мвт}$  наблюдается короткий пичок с длительностью переднего фронта  $\sim 0,6 \text{ мксек}$  и заднего 2 – 3 *мксек* (рис. 1, г). На рис. 2 приведена осциллограмма сигнала, соответствующего последнему случаю. Наблюдаемый пичок мы приписываем разрушению (пробое) экситонов<sup>1)</sup>. Детальные исследования этого эффекта пробоя показали, что он наблюдается в диапазоне энергий световой накачки  $10^{-7} - 10^{-6} \text{ Дж/импульс}$  (концентрация неравновесных носителей  $N_{e-h} \sim 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) в интервале температур  $1,3 \div 2,5^\circ \text{К}$ . Время задержки пробойного пичка зависит от уровня светового возбуждения: чем он меньше, тем раньше возникает пробой. Мы наблюдали изменение времени задержки от 160 до 30 *мксек*.

Наблюдается зависимость времени появления пробойного пичка от мощности СВЧ. Он возникает с задержкой 160 *мксек*, когда напряженность электрического поля в резонаторе достигнет величины 15 *в/см* ( $P_{\text{СВЧ}} \sim 5 \text{ Мвт}$ ), при увеличении напряженности  $E_{\text{СВЧ}}$  до 50 *в/см* время задержки уменьшается до 25 *мксек*. Время задержки линейно уменьшается с повышением температуры.

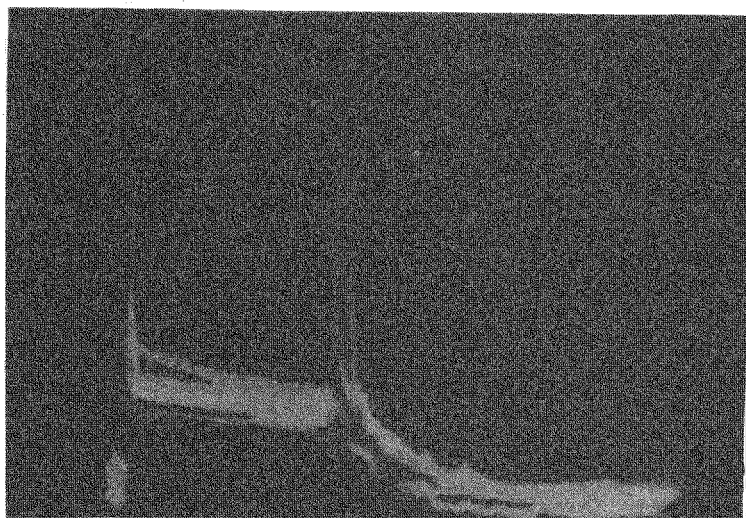


Рис. 2. Осциллограмма пробойного пичка, соответствующая случаю г на рис. 1

<sup>1)</sup> Здесь и ниже для краткости мы говорим о пробое экситонов, подразумевая также и разрушение экситонных образований (бикситонов и электрон-дырочных капель).

Постоянное магнитное поле существенно влияет на картину пробоя. В поле  $1 \text{ кГс}$  ( $H \perp E_{\text{СВЧ}}$ ) наблюдается до четырех пробойных пиков, при этом время появления пробоя уменьшается сначала при увеличении  $H$ , а затем при  $H > 500 \text{ Гс}$  увеличивается. При  $H \geq 2 \text{ кГс}$  пробой не наблюдается.

На малых уровнях СВЧ ( $P \leq 50 \text{ мкВт}$ ) обнаружена зависимость показателя длинной экспоненты от уровня световой накачки (рис. 3).

Когда образец помещен в пучность магнитного СВЧ поля, сигнал при любых уровнях мощности СВЧ и лазерной накачки практически не отличается по форме от рис. 1, а.

Форму сигнала при малых  $P_{\text{СВЧ}}$  можно интерпретировать следующим образом. Короткая экспонента описывает, по-видимому, процесс связывания свободных носителей, возбужденных лазерным импульсом, в экситоны и их образования (биэкситоны, капли). Длинная экспонента ( $\tau = 50 \text{ мксек}$ ) описывает их рекомбинацию. Характеристические времена обоих процессов совпадают с результатами исследования кинетики люминесценции биэкситонов в германии [3]. Отметим, что, как следует из рис. 3, длинная экспонента "уходит в шумы" при концентрации неравновесных носителей  $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 1,3^\circ \text{К}$ .

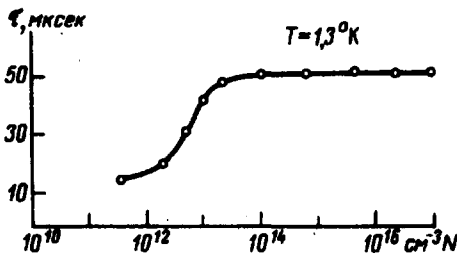


Рис. 3. Зависимость показателя длинной экспоненты от уровня световой накачки

При повышении мощности СВЧ происходит разогрев экситонов вследствие поглощения энергии СВЧ остаточными свободными носителями, которые передают свою энергию экситонам через столкновения.

При некоторой критической мощности СВЧ наступает сильный перегрев экситонов и их разрушение (тепловой пробой).

Наличие в магнитном поле нескольких пробойных пиков мы связываем с циклотронным резонансом в поле  $H \perp E_{\text{СВЧ}}$ .

Рассмотрим полученные результаты с точки зрения двух возможных форм существования экситонов при низких температурах.

В рамках модели биэкситонного газа пробой можно объяснить известной теорией СВЧ пробоя в обычных газах [7]. В наблюдаемом процессе рекомбинации биэкситонов (длинная экспонента) их концентрация уменьшается от максимального значения, соответствующего концентрации электронно-дырочных пар  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (энергия импуль-

са  $10^{-6}$  Дж). В определенный момент времени концентрация биэкситонов проходит оптимальное значение  $\sim 10^{14}$  см $^{-3}$ ; когда частота электрон-экситонных столкновений совпадает с частотой СВЧ поля, и на хвосте длинной экспоненты появляется прогрессивный "горб" (рис. 1, б, в), соответствующий максимуму поглощения. При  $P_{\text{СВЧ}} \geq 5$  мвт процесс нагрева носит лавинообразный характер и наступает тепловой пробой.

Остановимся на второй модели, предполагающей конденсацию экситонов в жидкую фазу. Допустим, что в результате импульсной световой накачки образуется капля размером  $\sim 10$  мк. Если эта капля помещена в поле  $E_{\text{СВЧ}}$  "магнитное" поглощение в ней меньше, чем в поле  $H_{\text{СВЧ}}$ , а "электрическое" поглощение намного меньше "магнитного" [8]. Таким образом, тепловой пробой скорее должен наблюдаться в поле  $H_{\text{СВЧ}}$ , что противоречит эксперименту. Особенности пробоя качественно объясняются с помощью газовой экситонной модели. Жидкие капли, если они образуются в результате импульсной световой накачки, по-видимому, не разрушаются под действием СВЧ поля.

Авторы благодарны В.С.Багаеву, Л.В.Келдышу и А.М.Прохорову за полезные обсуждения, Т.И.Галкиной за предоставление образцов, Ю.М.Холинову, А.Л.Виноградову, А.Б.Бороздину за помощь в работе.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 августа 1972 г.  
После переработки  
1 сентября 1972 г.

## Литература

- [ 1 ] Л.В.Келдыш. Экситоны в полупроводниках. М., изд. Наука, 1971 г., стр.5.
- [ 2 ] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин. Экситоны в полупроводниках. М., изд. Наука, 1971 г., стр. 19.
- [ 3 ] Б.В.Зубов, В.П.Калинушкин, Т.М.Мурина, А.М.Прохоров. Материалы Вавиловской конференции по нелинейной оптике, Новосибирск, 1971.
- [ 4 ] В.М.Аснин, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 7, 464, 1968.
- [ 5 ] Н.В.Карлов, А.А.Маненков. Квантовые усилители. М., ВИНТИ, 1966.
- [ 6 ] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, 13, 297, 1971.
- [ 7 ] В.Е.Голант. УФН, 15, 39, 1958.
- [ 8 ] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, М., изд. ТТЛ, 1957, стр. 384.