

## СВЧ ПРОБОЙ В Ge В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*А.А.Маненков, В.А.Миляев, В.А.Санина*

В работе обнаружено сильное влияние постоянного магнитного поля на характеристики импульсного СВЧ пробоя экситонов у Ge в присутствии электронно-дырочных капель при  $T = 1,3$  К. Зависимость пороговой мощности пробоя от величины магнитного поля сопоставлена со спектром циклотронного резонанса. Определена частота столкновений и температура горячих носителей.

Исследование эффекта импульсного СВЧ пробоя экситонного газа в присутствии электронно-дырочных капель (ЭДК) в [1] позволило определить ряд важных характеристик системы: свободные носители — экситоны — ЭДК, таких, как концентрацию носителей в каплях, радиус капель и их время жизни.

В работе [2] было отмечено влияние постоянного внешнего магнитного поля на характер пробоя экситонов в непрерывном поле СВЧ. Однако, ни детального исследования, ни интерпретации указанного эффекта не проводилось.

В условиях импульсного воздействия СВЧ поля также можно ожидать, что присутствие внешнего магнитного поля существенно скажется на свойствах пробоя экситонов. В частности, должен измениться порог, пробоя, особенно вблизи линий циклотронного резонанса, должны измениться временные характеристики пробоя, связанные с захватом свободных носителей каплями. Исследование указанных явлений может дать новую информацию о динамике горячих носителей и ЭДК. Изучение зависимости порога пробоя, от напряженности магнитного поля может позволить определить частоту столкновений свободных носителей в сильных СВЧ полях.

В связи с этим, в данной работе мы предприняли исследование импульсного СВЧ пробоя экситонного газа в Ge при  $T = 1,3\text{ К}$  в присутствии постоянного магнитного поля; при этом было обнаружено сильное влияние магнитного поля на пробой и изучены его характеристики.

Экспериментальная установка была подробно описана в работе [1]. Исследуемый образец помещался в максимум электрической компоненты СВЧ поля  $E_0$  в прямоугольном резонаторе. Носители возбуждались излучением YAG : Nd<sup>3+</sup> лазера ( $\lambda = 1,06\text{ мкм}$ , длительность импульса 30 нсек, частота следования импульсов 12,5 Гц, энергия в импульсе  $\sim 10^{-4}$  Дж). Постоянное магнитное поле создавалось электромагнитом который мог поворачиваться в горизонтальной плоскости, позволяя изменять ориентацию относительно кристаллографических осей образца Ge и СВЧ поля резонатора.

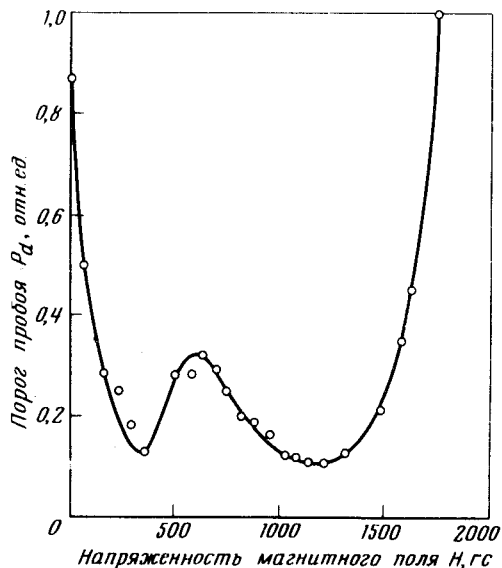


Рис. 1. Зависимость  $P_d$  — пороговой мощности импульсного СВЧ пробоя экситонов в Ge при  $T = 1,3\text{ К}$  в присутствии ЭДК от величины постоянного магнитного поля  $H$

Измерение порога импульсного пробоя показало, что он, как и ожидалось, существенно зависит от напряженности магнитного поля  $H$ . На рис. 1 приведена эта зависимость для времени задержки пробивающего СВЧ импульса относительно возбуждающего лазерного импульса  $\approx 150\text{ мксек}$ ; что соответствует минимальному значению порога [1]. Существенно отметить, что само временное положение минимума порога не зависело от  $H$ . Видно, что на кривой  $P_d(H)$  имеются два ми-

нимума при полях  $\sim 400$  и  $\sim 1200$  Гс, которые естественно связать с линиями циклотронного резонанса (ЦР). Действительно, измерения спектра ЦР при уровне мощности СВЧ много ниже порога пробоя экситонов показали (рис. 2, а), что в этих магнитных полях наблюдается две интенсивные линии ЦР. Таким образом, мы можем заключить, что наличие минимумов на кривой  $P_d(H)$  обусловлено циклотронным резонансом и, следовательно, по форме кривой можно оценить частоту столкновений горячих носителей.

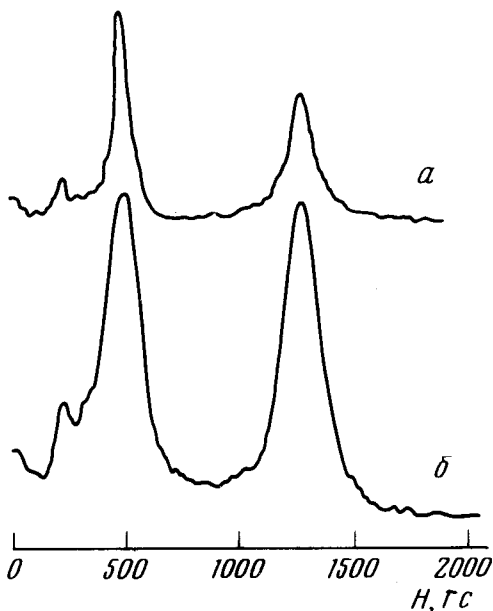


Рис. 2. Спектры циклотронного резонанса свободных носителей в Ge в присутствии ЭДК: а — при малом уровне СВЧ мощности ( $\sim 10$  мкВт); б — при повышенном уровне ( $\sim 2$  мВт). Ориентация образца несколько изменена по сравнению с экспериментом рис. 1

Вообще говоря, для корректного определения теоретической зависимости  $P_d(H)$  необходимо решать кинетическое уравнение для ударной ионизации в присутствии постоянного магнитного поля, однако, для качественного объяснения можно рассмотреть модель среднего электрона.

Средняя мощность поглощаемая одним носителем в СВЧ поле в условиях ЦР описывается формулой

$$P_{\text{погл}}(H) = \frac{E_0^2 e^2}{m \bar{\epsilon}^2 a^2} \frac{\nu}{\nu^2 + (\omega - \omega_c)^2} = P k(H), \quad (1)$$

где  $e$ ,  $m$ , и  $\nu$  — заряд, эффективная масса и частота столкновений носителей,  $\bar{\epsilon} = \epsilon_0 - 1 + 1/a$ ,  $\epsilon_0 = 16$  — диэлектрическая проницаемость решетки Ge,  $a$  — коэффициент деполаризации образца в электрическом поле,  $\omega$  — частота генератора СВЧ,  $\omega_c = eH/mc$  — циклотронная частота,  $P$  — подводимая СВЧ мощность,  $k(H)$  — коэффициент поглощения.

Сравним экспериментальные условия, при которых получены спектр ЦР (рис. 2) и кривая  $P_d(H)$  (рис. 1). В первом случае подводимая мощность постоянна  $P = \text{const}$ , значит  $P_{\text{погл}}(H) \sim k(H)$  — спектр ЦР. Во

втором случае средняя энергия горячего носителя  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  в СВЧ поле, которая (при  $\mathcal{E}_{\text{ср}} \sim kT$  [2]) пропорциональна  $P_{\text{погл}}(H)$ , в каждой точке кривой  $P_d(H)$ , соответствует потенциалу ионизации экситона. Таким образом, эксперимент проводится при условии  $P_{\text{погл}} = \text{const}$ , следовательно,  $P \equiv P_d(H) = \text{const} / k_1(H)$ . Здесь  $k_1(H)$  — коэффициент поглощения горячих носителей.

С помощью (1) находим из кривой  $P_d(H)$  частоту столкновений горячих носителей  $1,6 \cdot 10^{10} \text{сек}^{-1}$ .

Эта величина существенно выше, чем частота столкновений холодных носителей, измеренная при слабом уровне мощности СВЧ ( $\nu = 3 \cdot 10^9 \text{сек}^{-1}$ ) по ширине линии ЦР.

Эффект увеличения частоты столкновений мы непосредственно наблюдали по уширению линий ЦР при повышении уровня мощности СВЧ (рис. 2, б).

Известно, что при низких температурах природа уширения линии ЦР связана с электрон-фононными взаимодействиями, для которых частота столкновений зависит от энергии носителей  $\nu \propto \sqrt{\mathcal{E}_{\text{ср}}}$  [3].

Используя измеренные величины для холодных и горячих носителей находим, что энергия носителя на пороге пробоя в указанных выше условиях  $\mathcal{E}_{\text{ср}} = 37 \text{ К}$ , что близко к энергии связи экситона.

В экспериментах мы обнаружили также значительное влияние внешнего постоянного магнитного поля на форму пробойного пика, характеризующую процесс развития лавинной ионизации экситонов и захвата носителей каплями [1]. Это влияние заключалось в том, что передний и задний фронты пикового сигнала проводимости образца в условиях пробоя заметно удлиняются. По-видимому, этот эффект связан с уменьшением скорости ударной ионизации и захвата носителей ЭДК вследствие циклотронного закручивания траекторий свободных носителей в магнитном поле.

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

Поступила в редакцию  
15 марта 1979 г.

### Литература

- [1] Труды ордена Ленина Физического института им. П.Н.Лебедева Академии Наук СССР, М., изд. Наука, 1977, том 100.
- [2] А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, С.П.Смолин. Письма в ЖЭТФ, 16, 454, 1972.
- [3] П.С.Киреев. Физика полупроводников. М., изд. Высшая школа, 1975, стр. 402.