

**ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ  
В ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

*С.А. Виткалов, Г.М. Гусев, З.Д. Квон, Г.И. Левиев*

Экспериментально изучено воздействие микроволнового излучения на проводимость инверсионного канала на поверхности кремния. Впервые обнаружено подавление квантовых поправок к проводимости двумерного электронного газа высокочастотным полем.

В работе <sup>1</sup> теоретически исследовалось влияние высокочастотного электрического поля на квантовые поправки к проводимости, обусловленные эффектами локализации. Было показано, что электрическое поле высокой частоты приводит к сбоям фазы волновой функции электрона и подавлению интерференционных поправок к проводимости. Однако до настоящего времени отсутствовали какие-либо эксперименты, в которых наблюдался бы этот интересный и важный для понимания проблемы локализации эффект.

В данной работе экспериментально изучалось воздействие микроволнового излучения с частотой 9,1 ГГц на проводимость электронных инверсионных каналов. Обнаружено увеличение проводимости двумерного электронного газа при малых уровнях СВЧ мощности, что свидетельствует о подавлении эффектов локализации микроволновым полем. Эффекты разогрева электронного газа при малых амплитудах поля оказались пренебрежимо малыми.

Образцы представляли собой кремниевые МДП-транзисторы, изготовленные по обычной планарной технологии, с максимальной подвижностью  $\mu = 1,7 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при 4,2К и размерами канала  $1200 \times 400 \text{ мкм}^2$ . Чтобы обеспечить связь СВЧ поля с 2D электронным газом затворы транзисторов были изготовлены из полупрозрачной пленки титана толщиной  $d < 100 \text{ \AA}$ . Образцы облучались через диафрагму диаметром 4 мм в стенке прямоугольного резонатора. Высокочастотное электрическое поле было параллельно плоскости инверсионного слоя. Эксперименты проводились при различной ориентации поля и тянувшего тока. СВЧ излучение создавалось клистронным генератором, работавшим на частоте 9,1 ГГц в непрерывном режиме. Для увеличения чувствительности использовалась модуляция амплитуды СВЧ волны, падающей на образец, с частотой 2 кГц. В качестве модулятора использовался диод, подключенный к одному из плеч циркулятора.

В эксперименте измерялось изменение проводимости инверсионного канала  $\Delta G(P_\Omega) = G(P_\Omega) - G(0)$ , связанное с воздействием высокочастотного поля. Измерения проводились при температурах 2 – 10 К в магнитных полях до 70 кГс. На рис. 1 показано изменение проводимости  $\Delta G$  при концентрации электронов  $N_s = 9,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в зависимости от мощности микроволнового излучения  $P_\Omega$  при температурах 4,2 и 2 К. Как видно из этого рисунка, при малых значениях мощности  $\Delta G$  положительно, т. е. СВЧ поле в этой области  $P_\Omega$  увеличивает проводимость канала. При дальнейшем росте мощности  $\Delta G$  проходит через максимум, затем уменьшается и меняет знак. Отметим, что такое поведение  $\Delta G$  связано именно с воздействием электрического поля высокой частоты, так как разогрев постоянным током приводил к монотонному уменьшению проводимости. Описанное поведение проводимости можно объяснить в рамках теории слабой локализации. Возрастание проводимости при малых амплитудах СВЧ волны обусловлено подавлением локализационных поправок, предсказанных в работе <sup>1</sup>. При дальнейшем увеличении амплитуды начинают играть роль эффекты разогрева электронного газа, которые приводят к уменьшению проводимости<sup>1)</sup>.

Специально контролировалась симметрия вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора при смене направления тока. Наблюдавшаяся симметрия ВАХ позволяет исключить влияние эффектов выпрямления на проводимость.

Таким образом, наблюдаемое поведение проводимости хорошо объясняется, если предположить, что в исследуемой системе наблюдается подавление эффектов локализации СВЧ полем. Температурная зависимость  $\Delta G$  при малых уровнях мощности подтверждает это предположение. Как видно из рис. 1, уменьшение температуры от 4,2 до 2 К приводит к сильному увеличению  $\Delta G$ . Увеличение же температуры от 4,2 до 10К привело к исчезновению эффекта. Такое поведение обусловлено тем, что при увеличении  $T$  уменьшается время релаксации фазы волновой функции электрона  $\tau_\varphi$ <sup>3, 4</sup>. Падение  $\tau_\varphi$  приводит к тому, что, с одной стороны, уменьшается величина квантовой поправки<sup>5, 6</sup>, а с другой, резко падает эффектив-

<sup>1)</sup> В исследованной области температур, как показывает измерение температурной зависимости, она уменьшается приблизительно по линейному закону с ростом температуры<sup>2</sup>.

ность воздействия переменного электрического поля на процесс интерференции. Отметим, что  $\Delta G$ , обусловленное разогревом, меняется при изменении температуры значительно слабее.

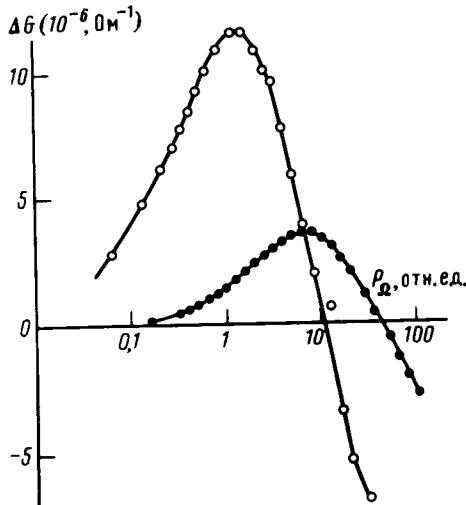


Рис. 1

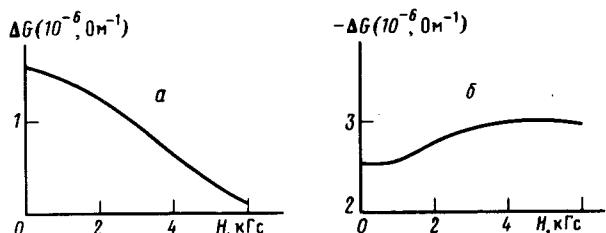


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость  $\Delta G$  инверсионного канала от мощности СВЧ излучения  $P_\Omega \cdot N_s = 9,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\circ - T = 2 \text{ K}$ ,  $\bullet - T = 4,2 \text{ K}$

Рис. 2. *a* – Зависимость  $\Delta G(P_\Omega)$  от магнитного поля при малых уровнях СВЧ мощности.  $P_\Omega = 1$  отн. ед.; *б* – зависимость  $\Delta G(P_\Omega)$  от магнитного поля при больших уровнях СВЧ мощности,  $P_\Omega = 100$  отн. ед.,  $N_s = 9,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $T = 4,2 \text{ K}$

Важным экспериментальным результатом, подтверждающим локализационный механизм воздействия СВЧ поля на проводимость исследованной системы, является влияние магнитного поля на  $\Delta G$ . Известно, что магнитное поле, как и СВЧ электрическое поле, подавляет квантовые локализационные поправки, что приводит к отрицательному магнетосопротивлению<sup>7</sup>. В двумерном электронном газе этот эффект был впервые экспериментально исследован в работе<sup>8</sup>. На рис. 2, *a* показана зависимость  $\Delta G$  от магнитного поля, когда преобладает эффект подавления локализации СВЧ полем. Видно, что  $\Delta G$  падает с ростом величины магнитного поля и уже в полях  $H \approx 6 \text{ кГс}$  микроволновое излучение практически не влияет на проводимость канала, поскольку квантовые поправки к проводимости уже подавлены магнитным полем. Рис. 2, *б* показывает, что при больших  $P_\Omega$ , когда эффект разогрева является доминирующим,  $\Delta G$  зависит от  $H$  значительно слабее.

Положительное значение  $\Delta G$ , свидетельствующее о подавлении квантовых поправок СВЧ полем, наблюдается не во всей исследованной области концентрации двумерных электронов. При  $N_s < 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $N_s > 1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$   $\Delta G$  имеет отрицательное значение. В первом случае это связано с уменьшением  $\tau_\varphi$  при понижении  $N_s$ , а во втором, по-видимому, с возрастанием роли эффектов разогрева при увеличении концентрации.

Количественное сравнение эксперимента и теории<sup>1</sup>, к сожалению, затруднено, так как остается неизвестным точное значение СВЧ мощности, поглощаемой каналом. Можно только оценить величину эффекта по формуле (5) из работы<sup>1</sup>. Эта оценка дает для  $E_\Omega = 0,1 \text{ В/см}$  и  $\tau_\varphi = 2 \cdot 10^{-11} \text{ с}$   $\Delta G = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$ , что по порядку величины совпадает с экспериментальным значением (рис. 2, *a*).

Таким образом, обнаруженное возрастание проводимости двумерного электронного газа у поверхности кремния под действием микроволнового излучения находится в соответствии с предсказанием теории<sup>1</sup>.

Авторы благодарят Д.Е.Хмельницкого за многочисленные обсуждения вопросов, затронутых в данной работе, Е.Б.Ольшанецкого за помощь, В.Н.Овсяку и И.Г.Неизвестного за поддержку данных исследований.

## Литература

1. Altshuler B.L., Aronov A.G., Khmelnitsky D.E. Sol. State Comm., 1981, **39**, 619.
2. Долгополов В.Т., Дорожкин С.И. Письма в ЖЭТФ, 1984, **40**, 245.
3. Wheeler R.C. Phys. Rev. B, 1982, **24**, 4645.
4. Altshuler B.L., Aronov A.G., Khmelnitsky D.E. J. Phys. C., 1982, **16**, 7367.
5. Anderson P.W., Abrahams E., Ramakrishnan T.V. Phys. Rev. Lett., 1979, **43**, 718.
6. Горьков Л.П., Ларкин А.И., Хмельницкий Д.Е. Письма в ЖЭТФ, 1979, **30**, 248.
7. Альтшуллер Б.Л., Аронов А.Г., Ларкин А.И., Хмельницкий Д.Е. ЖЭТФ, 1981, **81**, 768.
8. Kawagushi Y., Kawaji S. J. Phys. Soc. Japan, 1980, **48**, 699.

Институт физики полупроводников

Академии наук Сибирское отделение

Институт физики твердого тела

Академии наук СССР

Поступила в редакцию

29 декабря 1985 г.