

РЕЗОНАНСНЫЙ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ИНВЕРСИОННОМ СЛОЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Г.М.Гусев, З.Д.Квон, Л.И.Магарилл, А.М.Палкин,
В.И.Созинов, О.А.Шегай, М.В.Энтин

Обнаружен резонансный фотогальванический эффект, возникающий при возбуждении оптических переходов между уровнями размерного квантования в инверсионном слое на поверхности кремния и обусловленный отсутствием центра инверсии в этой системе.

В работе ¹ было теоретически показано, что в двумерной размерно-квантованной системе может возникать стационарный фототок вдоль поверхности. Этот фототок появляется под действием излучения, вызывающего межподзонные переходы и обусловлен отсутствием центра инверсии в системе пленка (инверсионный слой) — электромагнитное поле.

В данной работе этот эффект впервые обнаружен экспериментально в инверсионном слое на поверхности кремния при возбуждении межподзонного резонанса между первой и второй подзонами квантования субмиллиметровым излучением с энергией кванта $\hbar\omega = 10,45$ мэВ.

Экспериментальные образцы, исследованные в данной работе, представляли собой кремниевые МОП-транзисторы, изготовленные на поверхности кремния, отклоненной на угол $\theta = 9,5^\circ$ от поверхности (100) вокруг направления $[011]$. Такие образцы были использованы для того, чтобы имелась возможность возбудить переходы между квантовыми подзонами при нормальном падении света, когда вектор электрического поля волны направлен вдоль инверсионного слоя. Они имели размеры 1200×400 мкм, толщину подзатворного диэлектрика $d_{\text{SiO}_2} \approx 1200$ Å; в качестве затвора служила тонкая полупрозрачная пленка титана, имевшая сопротивление 1 кОм/□. Уровень легирования подложки $N_A = 10^{13}$ см⁻³, подвижность электронов в максимуме при $4,2$ К лежала в пределах $\mu = 1,6 \cdot 10^4 \div 1,9 \cdot 10^4$ см²/В·с. В качестве источника излучения использовался субмиллиметровый лазер, работавший на длине волны 119 мкм. Эксперимент проводился при температуре $T = 4,2$ К. Его геометрия приведена на рис. 1, а. Как видно из этого рисунка, экспериментальная структура состояла из двух МОП-транзисторов, ориентированных вдоль направления скоса А (транзистор 1) и перпендикулярно ему (транзистор 2). Линейно-поляризованное излучение падало нормально к поверхности структуры, а направление электрического поля волны E могло меняться произвольным образом в ее плоскости.

На рис. 1, б показана зависимость фотопроводимости исследованных образцов от затворного напряжения, когда $E \parallel A$. Хорошо видно, что при $V_3 = 3,1$ В фотопроводимость (ФП) обоих транзисторов имеет резкий пик, свидетельствующий о возникновении межподзонного

резонанса между первой и второй квантовыми подзонами, расстояние между которыми при $V_3 = 3,1$ В соответствует энергии кванта излучения. При $E \perp A$, как следовало ожидать, этот пик отсутствовал. Описанная поляризационная зависимость ФП в резонансе наблюдалась впервые. Отметим также, что поведение ФП в исследуемых образцах аналогично поведению резонансной ФП в инверсионных каналах, когда межподзонные переходы возбуждались нормальной компонентой электрического поля излучения ^{2,3}. Тогда в соответствии с предсказанием работы ¹ вместе с резонансом ФП должен наблюдаться резонанс фотоэдс. Теория ¹ строилась для изотропного энергетического спектра. Обобщение ее на случай (он реализован в эксперименте), когда нижние, оптически активные подзоны образованы из эллипсоида, большая ось которого отклонена на малый угол θ к нормали дает следующее выражение для фототока при нормальном падении излучения:

$$j = \text{Im} \left[\frac{E^* \cdot (E \cdot A)}{\hbar \omega - \epsilon_{21} + i\gamma} \right] \frac{e^3 N_s Z_{21}}{\omega} C \frac{m_{\parallel} - m_{\perp}}{m_1^2} \sin \theta \quad (1)$$

ϵ_{21} — расстояние между первой и второй подзонами, Z_{21} — матричный элемент поперечной координаты электрона, N_s — концентрация двумерных электронов, γ — уширение, C — константа порядка единицы, зависящая от поперечных волновых функций электрона, $|A| = 1$. В (1) учтена только баллистическая компонента фототока, т.е. вклад, связанный с анизотропией фотовозбуждения электронов по импульсу. Вообще говоря, имеется также и сдвиговая компонента, связанная со смещением электрона вдоль поверхности в процессе межподзонного перехода, но она мала по параметру θ^2 . В (1) присутствует как линейный, так и циркулярный эффекты. Для линейной поляризации, использованной в эксперименте, ток может быть записан в виде $j = \text{const} \cdot E(EA)$.

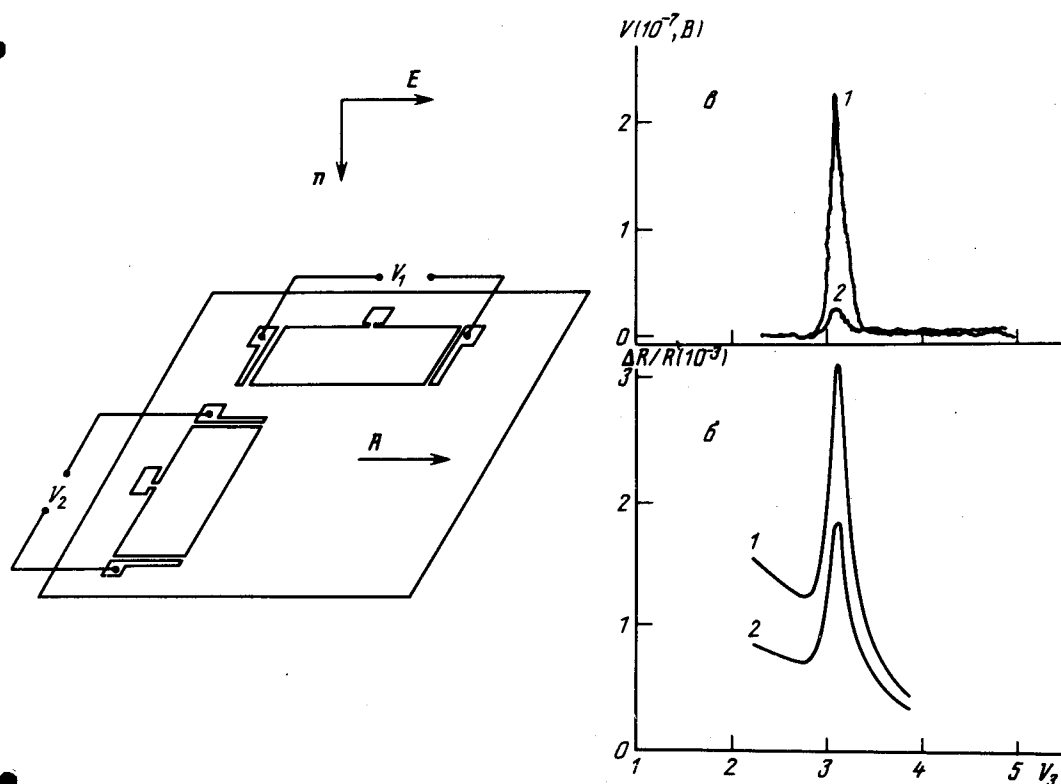


Рис. 1. а — Геометрия эксперимента; б — зависимость фотопроводимости от V_3 ; в — зависимость фотоэдс от V_3

На рис.1,а показана измеренная зависимость фотоэдс от V_3 для транзисторов 1 и 2, когда $E \parallel A$, т.е. когда в обоих транзисторах наблюдается резонансная ФП, показанная на рис.1,б. Как видно, при $V_3 = 3,1$ В на первом транзисторе наблюдается резонанс фотоэдс. На транзисторе 2 также виден сигнал, однако его величина на порядок меньше. Выражение (1) предсказывает именно такое поведение фотоэдс (небольшой сигнал, наблюдаемый на транзисторе 2, видимо, связан с неточным расположением плоскости структуры относительно падающего излучения). Это поведение также свидетельствует о том, что эффект не является болометрическим (в этом случае V_1 и V_2 были бы сравнимы по величине). При $E \perp A$ фотоэдс отсутствовала на обоих транзисторах также в соответствии с (1). Формула (1) предсказывает интересную поляризационную зависимость фотоэдс для транзистора 2: знак ее меняется при смене знака угла между E и A . Как хорошо видно из рис. 2, эксперимент подтверждает это предсказание. Количественное сравнение величины сигнала в резонансе с (1) дает также неплохое согласие: расчет по (1) с $C=1$ дает $V=1,8 \cdot 10^{-7}$ В.

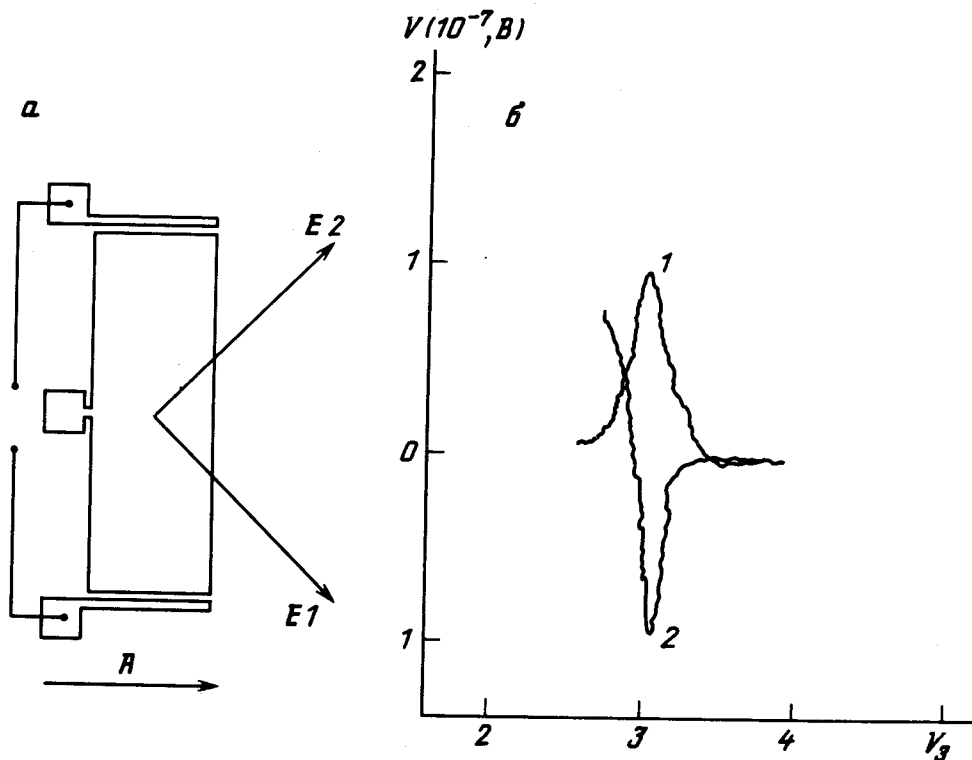


Рис. 2. Резонансная фотоэдс при двух направлениях E для транзистора 2

Следует отметить, что обнаруженный эффект родственен поверхностному фототоку^{4,5}, впервые наблюдавшемуся при межзонных переходах у поверхности GaAs. Однако он имеет ряд принципиальных отличий. Во-первых, эффект возникает в размерно-квантованной системе и поэтому является резонансным, тогда как в^{4,5} рассматривалась система классических электронов. Во-вторых, в нашем случае фотогальванический эффект возникает при нормальном падении света^{4,6}, а не при наклонном, как требовалось в работе⁵.

Таким образом, в данной работе впервые обнаружен резонансный фотогальванический эффект, возникающий при возбуждении оптических переходов между подзонами размерного квантования в инверсионном слое на поверхности полупроводника и обусловленный отсутствием центра инверсии в этой системе. Этот эффект открывает новый класс явлений в двумерных электронных системах и поэтому представляется важным его дальнейшее исследование в особенности, в магнитном поле. Он является также новым инструментом спектроскопии размерно-квантованных систем.

В заключение авторы благодарят В.Л.Альперовича и А.С.Терехова за полезное обсуждение работы, а И.Г.Неизвестного и В.Н.Овсюка за поддержку данных исследований.

Литература

1. Магариш Л.И., Энтин М.В. Поверхность, 1982, 1, 74.
2. Hu C.C., Pearse J., Cham K., Wheeler R.G. Surf. Sci., 1978, 73, 207.
3. Neppel F., Kotthaus J.P., Koch J.F. Phys. Rev. B, 1979, 19, 5240.
4. Магариш Л.И., Энтин М.В. ФТТ, 1979, 21, 1280.
5. Альперович В.Л., Белиничер В.И., Новиков В.И., Терехов А.С.. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 581.
6. Ивченко Е.Л., Пикус Г.Е., Тезисы докл. 12-го совещания по теории полупроводников. Киев, 1985, с. 283.

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
28 апреля 1987 г.