

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ФОТОТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.П.Дмитриев, С.А.Емельянов, Я.В.Терентьев,
И.Д.Ярошецкий

Обнаружено новое явление. – интерференционный резонансный фототок в полупроводниках. Эффект наблюдался в n -InSb в области примесного спинового резонанса в квантующем магнитном поле. Направление тока зависит от знака отстройки частоты излучения от резонанса и от направления света. Предложена теория явления.

Эксперименты проводились в геометрии Фарадея на образцах чистого n -InSb ($n = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\mu = 7 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) при $T = 2 \text{ К}$. Использовался импульсный лазер на NH_3 с оптической накачкой. Длина волны излучения $\lambda = 90,55 \text{ мкм}$, длительность импульса $\tau_u = 40 \text{ нс}$. Интенсивность неполяризованного света, падавшего на образец, составляла 100 Вт/см^2 . Обнаружено возникновение продольного по отношению к магнитному полю фототока. Измерялась зависимость этого тока от величины магнитного поля H в области оптических переходов с переворотом спина.

Результаты представлены на рис. 1, кривая *a*. Обращают на себя внимание два ярко выраженных резонанса (*A* и *B*). Эти же резонансы наблюдались в фотопроводимости. Для их идентификации фотопроводимость образца измерялась при различных напряжениях на нем (рис. 1, кривые *б, в*). Видно, что при напряжении, превышающем порог пробоя примеси, наблюдается резкое возрастание второго резонанса и уменьшение первого. Это позволяет заключить, что резонанс *A* соответствует переходам с примесного уровня, а резонанс *B* — переходам свободных электронов. Такой вывод подтверждается данными работ ^{1, 2}, где эти же резонансы ($000^+ \rightarrow 000^-$ и $0^+ \rightarrow 0^-$) наблюдались в поглощении и фотопроводимости. Удивительным, с нашей точки зрения, является существование резонансного фототока, связанного с переходами между примесными уровнями. В настоящей работе мы ограничимся обсуждением только этого резонанса.

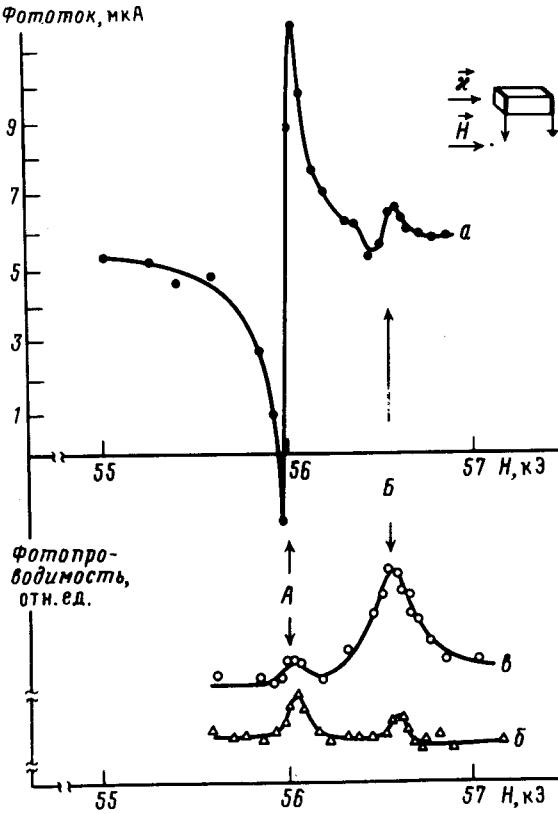


Рис. 1. *a* — Зависимость фототока от магнитного поля H ; *б, в* — зависимость фотопроводимости от H при напряжениях на образце 0,1 и 4 В/см соответственно

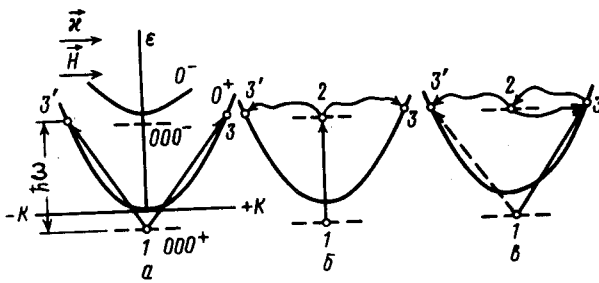


Рис. 2. Возможные пути оптического перехода электрона с примесного уровня 000^+ в зону 0^+ с учетом промежуточного состояния 000^-

Из рис. 1, кривая *a* видно, что он является двухполярным с глубиной модуляции, сравнимой с фоновым сигналом, причем расстояние по H между минимумом и максимумом тока весьма мало по сравнению с шириной "крыльев". В то же время, резонансные кривые фотопроводимости (рис. 1, кривые *б, в*) и поглощения (см. ¹) имеют лоренцеву форму.

Для выяснения природы явления существенно отметить два экспериментальных факта. Во-первых, кинетика фототока повторяет кинетику лазерного импульса ($\tau_u = 40$ нс), тогда как длительность сигнала фотопроводимости, определяемая временем энергетической релаксации, превышает 100 нс. Это означает, что наблюдаемый ток не может быть обусловлен различными фотоградиентными эффектами (см., например, ³). Во-вторых, фототок нечетен по волновому вектору света и четен по H ; поэтому он не может быть связан с фотогальваническим эффектом ⁴.

Мы предлагаем следующий механизм образования фототока. В условиях эксперимента большинство электронов находится в связанном состоянии на уровне 000^+ . Под действием света часть из них переходит в свободное состояние. Фототок возникает за счет различия полных амплитуд переходов из связанного состояния 1 в состояния сплошного спектра 3 и $3'$ (рис. 2). Вне области резонанса имеет место обычный эффект увлечения при фотоионизации примеси ⁵; различие амплитуд P и P' переходов в 3 и $3'$ (рис. 2а) обусловлено импульсом фотона k .

Однако, в области резонанса, когда энергия конечного состояния электрона приближается к энергии примесного уровня 000^- , ситуация становится качественно иной. Кроме описанного выше пути перехода из 1 в 3 (или $3'$) появляются еще два: 1) Электродипольный переход $1 \rightarrow 2$, обусловленный k^3 -членами в гамильтониане ^{6, 7}, с последующим переходом в 3 (или $3'$) за счет спин-орбитального взаимодействия V^{SO} в кулоновском поле примеси (рис. 2б). 2) Переход в 3 ($3'$) с одновременным резонансным рассеянием электрона вперед ($3' \rightarrow 2 \rightarrow 3$) и назад ($3 \rightarrow 2 \rightarrow 3'$) (рис. 2в). Амплитуду этого перехода обозначим через R , а амплитуду аналогичного перехода в 3 — через R' .

Очевидно, что все указанные пути интерферируют между собой, так что при вычислении полных вероятностей переходов из 1 в 3 и $3'$ следует складывать соответствующие им амплитуды, а не вероятности. Амплитуды P и R можно представить в виде:

$$P \sim P_1 + \frac{\kappa}{k} P_2 ; \quad R \sim - R_0 \frac{\kappa}{k} \frac{\Gamma}{\Delta + i\Gamma} \quad (1)$$

Здесь $\Delta = \hbar(\omega - \omega_0)$ — отстройка от резонанса; Γ — ширина уровня 000^- ; k — импульс электрона в точке 3 ; а P_1, P_2, R_0 — положительны и близки по порядку величины. Последнее объясняется тем, что в одномерном случае амплитуда резонансного рассеяния волны в области резонанса близка к единице, т. е. к амплитуде нерассеянной (падающей) волны. Отметим также, что выражения для P' и R' отличаются от (1) знаком перед k .

Существенно, что амплитуда R , в противоположность P , отлична от нуля только в меру k . Это связано с тем, что в нашем случае резонансное рассеяние обусловлено спин-орбитальным взаимодействием в поле примеси (спин электрона в зоне 0^+ направлен вверх, а его орбитальный момент равен -1 ; в состоянии же 000^- орбитальный момент равен нулю, а спин направлен вниз). Матричный элемент такого взаимодействия нечетен по импульсу электрона. Поэтому амплитуды волн, рассеянных вперед и назад и соответствующих, следовательно, противоположным импульсам, имеют противоположные знаки. Полная амплитуда перехода электрона под действием света с уровня 000^+ в зону 0^+ с одновременным резонансным рассеянием есть сумма амплитуд, соответствующих рассеянию вперед и назад. Если теперь учитывать импульс фотона, то эти вклады полностью скомпенсируют друг друга. Учет же импульса фотона κ приводит к различию этих слагаемых в меру κ/k . Подчеркнем также, что как P , так и R не зависят от направления H . Что касается амплитуды перехода $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, связанного с k^3 -членами, то она, согласно ⁶, должна быть нечетна по H . Однако эффект, наблюдаемый в наших экспериментах, не имеет существенной зависимости от направления магнитного поля. Это означает, что вклад перехода $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ сравнительно мал.

Таким образом, полная амплитуда M перехода под действием света в состояние 3 есть $M = P + R$, а амплитуда перехода в состояние $3'$ есть $M' = P' + R'$. Интересующий нас ток электронов $j \sim \frac{\langle k \rangle}{m} (|M|^2 - |M'|^2) ne$, где $\langle k \rangle = k \frac{\Delta^2}{\Delta^2 + \Gamma^2}$ — импульс электрона в зоне; m — эффективная масса; n — концентрация электронов. Используя (1), получим для резонансного вклада в фототок:

$$j - j_{\phi} \sim - \frac{\Delta^3 \Gamma}{(\Delta^2 + \Gamma^2)^2}, \quad (2)$$

где j_{ϕ} — нерезонансный фоновый фототок.

Эта зависимость хорошо описывает экспериментальную кривую на рис. 1а, в частности, ее двухполярный характер и относительно пологий спад ($\sim 1/\Delta$) вдали от резонанса.

В заключение отметим, что в нашей ситуации коэффициент поглощения света α , который, в отличие от j , пропорционален сумме квадратов матричных элементов M и M' , описывается лоренцевским контуром. Отсутствие асимметричной добавки Фано⁸ связано с тем, что в нашем случае главные интерференционные слагаемые в $\alpha \sim |M|^2 + |M'|^2$ компенсируют друг друга.

Литература

1. McCombe B.D., Wagner R.J. Proc. 11-th Int Conf. Phys. Semicond, Warsaw, 1972, 1, 321.
2. Kuchar F., Meisels R., Stradling R.A., Najda S.P. Sol. St. Comm., 1984, 52, 487.
3. Палкин А.М., Созинов В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 231.
4. Ивченко Е.Л., Пикус Г.Е. Проблемы современной физики. Л.: Наука, 1980, с. 275.
5. Валов П.М., Рыбкин Б.С., Рыбкин С.М. и др. ФТП, 1971, 5, 1772.
6. Раиша Э.И., Шека В.И. ФТТ, 1961, 3, 1735.
7. Chen 'G.F., Dobrovolska M., Furdyna J.K., Rodrigues S. Phys. Rev. B, 1985, 32, 890.
8. Fano U. Phys. Rev., 1961, 124, 1866.

Поступила в редакцию

4 января 1989 г.

После переработки

25 марта 1989 г.