

09

Влияние интерференции в подложке на эффект преобразования поляризации электромагнитной волны при циклотронном резонансе в двумерной электронной системе

© В.В. Попов, Т.В. Теперик

Институт радиотехники и электроники РАН (Саратовское отделение)
E-mail: popov@ire.san.ru

Поступило в Редакцию 15 марта 2000 г.

Теоретически исследовано влияние интерференционных явлений в подложке на эффект преобразования поляризации электромагнитной волны при возбуждении циклотронного резонанса в двумерной ($2D$) электронной системе. Предсказано существенное усиление эффекта преобразования поляризации за счет интерференционных явлений при расположении $2D$ электронной системы на тыльной поверхности подложки четвертьволновой толщины. В этом случае происходит практически полное преобразование поляризации отраженной волны.

Влияние интерференции в подложке на форму линии циклотронного резонанса в двумерном ($2D$) электронном газе исследовалось в ряде работ как теоретически, так и экспериментально [1–4]. При этом в экспериментах измерялось относительное изменение суммарного (по обеим ортогональным поляризациям) коэффициента прохождения мощности волны при резонансе. Было показано, что положение и ширина линии циклотронного поглощения осциллируют с изменением толщины подложки.

Интерференционные явления в подложке часто рассматриваются экспериментаторами как нежелательные, и для их устранения применяются специальные технические приемы (нарушается плоскопараллельность подложки) [5]. В то же время в некоторых работах предлагается использовать интерференцию в подложке для увеличения исследуемых эффектов. Так в работе [6] показано, что с помощью специального

выбора толщины подложки можно существенно увеличить эффективность возбуждения плазменных колебаний в $2D$ электронной системе. В данной работе исследуется влияние интерференционных явлений в подложке на эффект преобразования поляризации электромагнитной волны при возбуждении циклотронного резонанса в $2D$ электронной системе.

В работе [7] теоретически исследовалось преобразование поляризации электромагнитной волны при циклотронном резонансе в $2D$ электронной системе, расположенной на границе раздела двух диэлектриков. Было показано, что наибольшее преобразование поляризации имеет место в отраженной волне при падении внешней электромагнитной волны из оптически более плотной среды. Однако при экспериментальной реализации этого явления возникает проблема "закачки" электромагнитной волны в оптически более плотную среду. Структура с плоскопараллельной подложкой, исследуемая в настоящей работе, позволяет решить эту проблему наиболее естественным путем. Показано, что при определенных условиях интерференция в подложке приводит к существенному увеличению эффекта преобразования поляризации волны в такой структуре.

Будем рассматривать нормальное падение линейно-поляризованной электромагнитной волны на плоскопараллельную диэлектрическую подложку толщиной d с $2D$ электронным слоем, расположенным на одной из поверхностей подложки. Внешнее магнитное поле \mathbf{B}_0 направлено перпендикулярно плоскости $2D$ электронной системы.

Коэффициенты преобразования мощности падающей волны определяются в виде соотношений [7]:

$$\begin{aligned} R_{pp} &= \frac{P_{rp}}{P_{ip}}, & R_{sp} &= \frac{P_{rs}}{P_{ip}}, \\ T_{pp} &= \frac{P_{tp}}{P_{ip}}, & T_{sp} &= \frac{P_{ts}}{P_{ip}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где P_{ip} — величина плотности потока энергии падающей волны; P_{rp} и P_{tp} — плотности потоков энергии соответственно отраженной и прошедшей волн с поляризацией, совпадающей с поляризацией падающей волны; P_{rs} и P_{ts} — плотности потоков энергии отраженной и прошедшей волн с линейной поляризацией, ортогональной по отношению к поляризации падающей волны. Величины R_{sp} и T_{sp} имеют смысл коэффициентов преобразования поляризации волны.

Величины потоков энергии в прошедшей и отраженной волнах вычисляются в результате решения уравнений Максвелла в области подложки и в окружающих ее средах с граничными условиями на поверхностях раздела сред, учитывающими отклик магнитоактивной $2D$ электронной плазмы. Диэлектрические постоянные окружающих подложку сред полагаются равными единице. Компоненты тензора проводимости $2D$ электронной плазмы в магнитном поле задаются выражениями

$$\sigma_{\perp} = \sigma_0 \frac{1 - i\omega\tau}{(\omega_c\tau)^2 + (1 - i\omega\tau)^2}, \quad \sigma_{\times} = -\sigma_0 \frac{\omega_c\tau}{(\omega_c\tau)^2 + (1 - i\omega\tau)^2}, \quad (2)$$

где ω — круговая частота волны; $\omega_c = |e|B_0/m^*$ — циклотронная частота; $\sigma_0 = e^2N_s\tau/m^*$ — проводимость $2D$ электронной системы на постоянном токе в отсутствие внешнего магнитного поля; e , m^* , N_s и τ — соответственно заряд, эффективная масса, поверхностная концентрация и феноменологическое время релаксации импульса электронов в $2D$ системе. В расчетах использовались параметры, характерные для структур с $2D$ электронным газом на основе арсенида галлия.

Расчеты показывают, что наиболее эффективное преобразование поляризации получается в отраженной волне. В этом смысле ситуация аналогична случаю, рассмотренному в [7]. Поэтому в дальнейшем ограничимся обсуждением коэффициентов преобразования R_{sp} и R_{pp} .

Сначала рассмотрим ситуацию, когда $2D$ электронная система расположена на лицевой поверхности подложки. При этом реализуется случай, когда внешняя электромагнитная волна падает непосредственно на поверхность $2D$ системы из оптически менее плотной среды. На рис. 1 приведены расчетные зависимости коэффициентов преобразования R_{sp} и R_{pp} от магнитного поля, полученные без учета электронного рассеяния в $2D$ системе ($1/\tau = 0$), для различных значений безразмерной приведенной толщины подложки

$$y = 2\sqrt{\epsilon_s}d/\lambda - N, \quad (3)$$

где ϵ_s — диэлектрическая постоянная материала подложки, λ — длина электромагнитной волны в пустоте, N — натуральное число, выбираемое из условия $0 \leq y < 1$. Из рис. 1 следует, что интерференционные явления в подложке оказывают сильное влияние на высоту, ширину и положение резонансных кривых для коэффициентов преобразования. Наибольшее преобразование поляризации имеет место при значении $y = 0$,

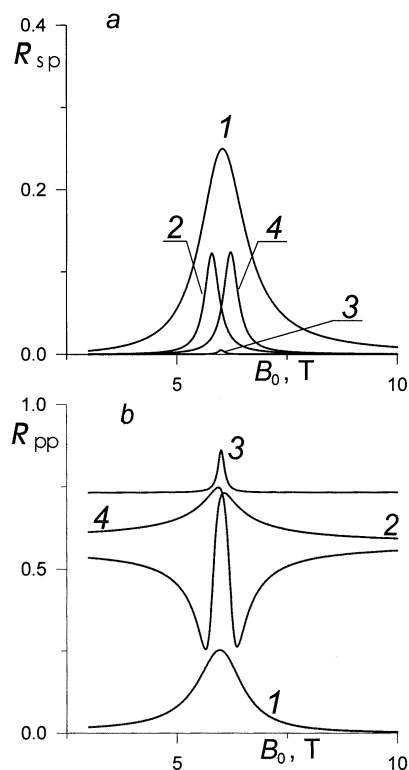


Рис. 1. Зависимости коэффициентов преобразования от магнитного поля на частоте 80 см^{-1} в структуре, когда $2D$ электронная система расположена на лицевой поверхности подложки при $\epsilon_s = 12.8$, $1/\tau = 0$, $N_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $m^* = 0.07m_0$, где m_0 — масса свободного электрона. y : 0 (1); 0.25 (2); 0.5 (3); 0.75 (4).

т.е. когда подложка обладает полуволновой толщиной $d = N\lambda/2\sqrt{\epsilon_s}$. В этом случае электромагнитная волна "не замечает" присутствия подложки и резонансные кривые для коэффициентов преобразования при $y = 0$ оказываются точно такими же, как если бы $2D$ электронная система была помещена в однородное пространство с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1$.

При четвертьволновой толщине $d = (2N + 1)\lambda/4\sqrt{\epsilon_s}$ (чему соответствует значение $y = 0.5$) подложка проявляет наибольшую отражательную способность. При этом преобразование поляризации крайне мало. Этот факт согласуется с результатами работы [7] для случая, когда электромагнитная волна падает на поверхность оптически более плотной среды с $2D$ электронным слоем. При $y = 0; 0.5$ максимальное преобразование поляризации происходит вблизи циклотронной частоты $\omega_c \simeq \omega$. Для указанных значений параметра y незначительное увеличение резонансного магнитного поля происходит при больших концентрациях электронов в $2D$ системе. Аналогичный эффект обсуждался в [7] для структуры без подложки. При $0 < y < 0.5$ ($0.5 < y < 1$) положение резонанса смещается в сторону более низких (высоких) значений магнитного поля (см. рис. 1). Таким образом, положение, высота и ширина резонансных кривых для коэффициентов преобразования осциллирует с изменением толщины подложки. При промежуточных значениях параметра $y \neq 0; 0.5$ резонансные кривые становятся несимметричными. Подобная "затяжка" одного из краев резонансной кривой наблюдалась ранее при изучении циклотронного поглощения в плоскопараллельных образцах [1–4,8,9].

Как видно из рис. 1, максимально достижимый коэффициент преобразования поляризации при расположении $2D$ электронной системы на лицевой поверхности подложки не превышает 30%. Причем интерференция в подложке приводит к уменьшению коэффициента преобразования. Ситуация кардинальным образом меняется, если $2D$ электронную систему поместить на тыльную поверхность подложки. Коэффициент преобразования поляризации R_{sp} существенно возрастает при четвертьволновой толщине подложки $y = 0.5$ (рис. 2, *a*) и даже становится больше соответствующего коэффициента для случая падения волны из оптически более плотной среды в структуре с двумя диэлектрическими средами [7] (штриховая линия *b* на рис. 2, *a*). Интересно отметить, что в отличие от структуры без подложки коэффициент преобразования R_{pp} (рис. 2, *b*) обращается в нуль в точке максимума коэффициента R_{sp} . Таким образом, имеет место полное преобразование поляризации отраженной волны. Так же как и при расположении $2D$ системы на лицевой поверхности подложки параметры резонансных кривых на рис. 2 периодически осциллируют с толщиной подложки. Естественно, что при $y = 0$ резонансные кривые для обеих геометрий совпадают.

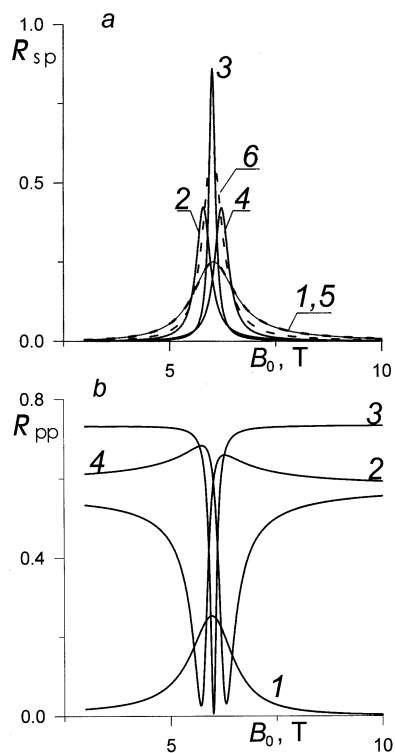


Рис. 2. Зависимости коэффициентов преобразования от магнитного поля на частоте 80 см^{-1} в структуре, когда $2D$ электронная система расположена на тыльной поверхности подложки. Параметры структуры те же, что и на рис. 1. y : 0 (1); 0.25 (2); 0.5 (3); 0.75 (4). Штриховыми линиями показаны зависимости для структуры без подложки при падении волны из среды с диэлектрической постоянной ε_1 на среду с диэлектрической постоянной ε_2 [7], $\varepsilon_1/\varepsilon_2$: 1/1 (5); 12.8/1 (6).

В заключение заметим, что рассмотренный в данной статье эффект преобразования поляризации остается весьма значительным ($R_{sp} > 0.4$) и при учете реального электронного рассеяния в $2D$ системах на основе арсенида галлия, что дает принципиальную возможность экспериментального наблюдения и технического использования этого эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы" по проекту 696.3.

Список литературы

- [1] *Von Ortenberg M.* // Sol. St. Commun. 1975. V. 17. N 11. P. 1335–1338.
- [2] *Kennedy T.A., Wagner R.J., McCombe B.D., Quinn J.J.* // Sol. St. Commun. 1976. V. 14. N 3. P. 275–278.
- [3] *Abstreiter G., Kotthaus J.P., Koch J.F., Dorga G.* // Phys. Rev. B. 1976. V. 14. N 6. P. 2480–2493.
- [4] *Сучалкин Л.Д., Васильев Ю.Б., Иванов Ю.Л.* // ФТП. 1993. Т. 27. В. 11/12. С. 2075–2077.
- [5] *Merkt U., Horst M., Evelbauer T., Kotthaus J.P.* // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. N 10. P. 7234–7345.
- [6] *Попов В.В., Цымбалов Г.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 9. С. 70–74.
- [7] *Попов В.В., Тенерик Т.В.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 21. С. 21–26.
- [8] *Blyssen H., Maan J.C., Wyder P., Chang L.L., Esaki L.* // Sol. St. Commun. 1979. V. 31. N 1. P. 35–38.
- [9] *Kim L.S., Drew N.D., Munekata H., Chang L.L., Esaki L.* // Sol. St. Commun. 1988. V. 66. N 8. P. 873–876.