

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайбуллин И. Б., Штырков Е. И., Зарипов М. М., Галаятдинов М. Ф., Баязитов Р. М. Отжиг ионолегированных слоев под действием лазерного излучения.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 2061-74. Деп. от 06.07.74.
2. Хайбуллин И. Б., Штырков Е. И., Зарипов М. М.— Изв. АН СССР. Физика, 1981, т. 45, № 8, с. 1464.
3. White C. W., Wilson S. R., Appleton B. R., Young F. W.— J. Appl. Phys., 1980, v. 51, № 1, p. 738.
4. Natsuaki N., Tamura M., Tokuyama T.— J. Appl. Phys., 1980, v. 51, № 1, p. 738.
5. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М. Таблицы параметров пространственного распределения ионоимплантированной примеси.— Минск, 1980, с. 352.
6. Гайдук П. И., Комаров Ф. Ф.— Тез. докл. XII совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1982, с. 129.
7. Koichiro Hoh, Hiroshi Koyama, Keiichiro Uda, Yoshio Miura.— Jap. J. Appl. Phys., 1980, v. 19, № 7, p. L375.
8. Garulli A., Servidoli M., Veechi I.— J. Phys. D: Appl. Phys., 1980, v. 13, № 10, p. L199.

Поступила в редакцию
07.06.82.

НИИ ПФП, кафедра ФТТ

УДК 538

В. В. ГУСАКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА РАДИОСПЕКТРОМЕТРА

Величина регистрируемого сигнала электронного парамагнитного резонанса в спектрометре ЭПР зависит от параметров исследуемого образца (концентрация парамагнитных центров, величина мощности насыщения и т. д.) и от конструктивных характеристик спектрометра (мощность СВЧ-генератора, добротность измерительного резонатора, параметры связи резонатора с СВЧ-трактом, тип детектора). Задача установления зависимости величины сигнала от характеристик СВЧ-элементов спектрометра и параметров образца для ряда ограниченных случаев решалась в [1, 2]. Для спектрометров с проходным измерительным ре-

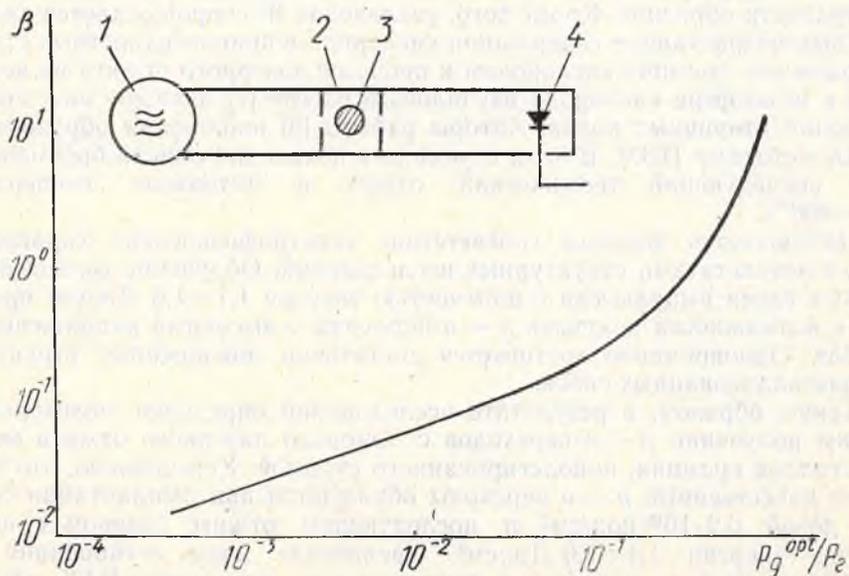


Рис. 1. Номограмма оптимальных по току детектора значений и схема СВЧ-тракта спектрометра ЭПР с проходным измерительным резонатором:

1 — генератор; 2 — измерительный резонатор; 3 — образец; 4 — детектор

зонатором (рис. 1), удобных для использования в учебных целях и при экспресс-анализе, величина сигнала ЭПР ΔI определяется следующими выражениями:

$$\text{для квадратичного детектора } \Delta I \sim \Delta P_d = \frac{8\beta_1\beta_2}{(\beta_1+\beta_2+1)^3} \cdot P_r \cdot \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (1a)$$

$$\text{для линейного детектора } \Delta I \sim \Delta U_d = \frac{2\beta_1^{1/2}\beta_2^{1/2}}{(\beta_1+\beta_2+1)^{1/2}} \cdot P_r^{1/2} \cdot R_d^{1/2} \cdot \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (1б)$$

где ΔP_d — изменение СВЧ-мощности на детекторе, вызванное парамагнитным поглощением; ΔU_d — изменение СВЧ-напряжения на детекторе, вызванное парамагнитным поглощением; β_1 — коэффициент связи измерительного резонатора с СВЧ-трактом со стороны генератора; β_2 — коэффициент связи измерительного резонатора с СВЧ-трактом со стороны детектора; P_r — мощность генератора; R_d — сопротивление детектора; $\frac{\Delta Q}{Q}$ — относительное изменение добротности измерительного резонатора, вызванное парамагнитным поглощением.

Задача нахождения оптимальных значений β_1 и β_2 с целью повышения чувствительности сводится [1, 2] к определению максимума функции $S(\beta_1, \beta_2)$:

$$\text{для квадратичного детектора } S_{\text{кв}}(\beta_1, \beta_2) = \frac{8\beta_1\beta_2}{(\beta_1+\beta_2+1)^3}, \quad (2a)$$

$$\text{для линейного детектора } S_{\text{л}}(\beta_1, \beta_2) = \frac{2\beta_1^{1/2}\beta_2^{1/2}}{(\beta_1+\beta_2+1)^2}. \quad (2б)$$

В обоих случаях задача имеет одно решение: $\beta_1 = \beta_2 = 1$ для квадратичного детектора, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ для линейного.

При таком подходе, во-первых, игнорируется необходимость установления оптимального значения мощности на детекторе P_d (1) и, во-вторых, не учитываются неизбежные в условиях парамагнитного насыщения ограничения на мощность P_p , рассеиваемую в измерительном резонаторе.

Целью работы являлось определение оптимальных условий работы спектрометра применительно к реальным экспериментальным ситуациям (заданные значения P_d и P_p).

Оптимизация чувствительности по току детектора. В отсутствие эффектов насыщения задача оптимизации должна быть поставлена следующим образом: определить точки максимума функции $S(\beta_1, \beta_2)$ при постоянной мощности P_d . Как следует из схемы, показанной на рис. 1,

$$P_d = \frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_1+\beta_2+1)^2} P_r. \quad (3)$$

Таким образом, для квадратичного детектора необходимо определить точки максимума функции $S_{\text{кв}}(\beta_1, \beta_2)$ (2a) при

$$\frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_1+\beta_2+1)^2} P_r = P_d^{\text{opt}}. \quad (4)$$

В случае линейного детектора с учетом уравнения связи (4) находят точки максимума функции $S_{\text{л}}(\beta_1, \beta_2)$ (2б).

Задача решалась методом множителей Лагранжа и в отличие от [1] имеет совпадающие в обоих случаях решения:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta = \frac{a + a^{1/2}}{2(1-a)}, \quad a = \frac{P_d^{\text{opt}}}{P_r}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведена номограмма для определения оптимального значения β , обеспечивающего максимальное отношение сигнал/шум и отсутствие перегрузки. Для точечных кремниевых диодов при $P_d^{\text{opt}} = 1$ мВт и $P_r = 50$ мВт (генератор на основе диода АА703Б) $\beta \approx 0,1$, тогда как для следующего из решения (2 а) $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $P_d = 22$ мВт, что превышает предельно допустимое для детекторного диода значение.

На практике требуемую величину P_d^{opt} обычно устанавливают регулировкой входного аттенюатора (уменьшением P_r). Величина сигнала в этом случае, как следует из (1) и (3),

$$\text{для квадратичного детектора } \Delta I' \sim \Delta P_d' = S_{\text{КВ}}(1,1) \frac{9}{4} P_d^{\text{opt}} \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (6a)$$

$$\text{для линейного детектора } \Delta I' \sim \Delta U_d' = S_{\text{Л}} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) 4 P_d^{\text{opt}} \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (6б)$$

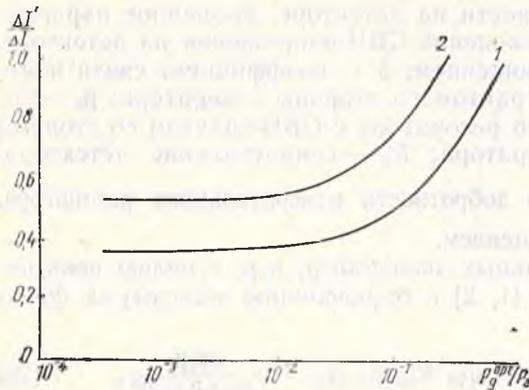
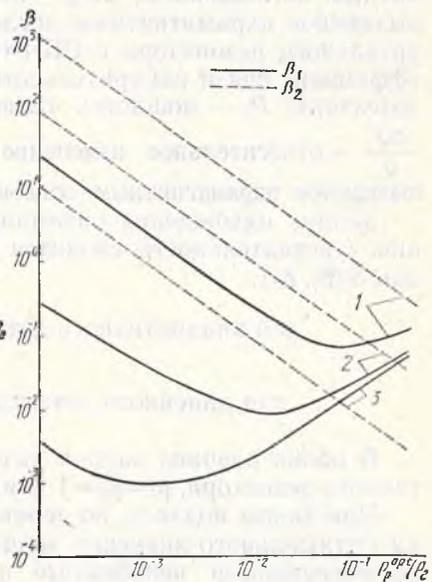


Рис. 2. Отношение сигнала $\Delta I'$ при регулировке аттенюатором к сигналу ΔI (регулировка β_1 и β_2) как функция P_d^{opt}/P_r ;

1 — квадратичный; 2 — линейный детекторы

Рис. 3. Номограмма оптимальных значений β_1 и β_2 с учетом парамагнитного насыщения для $P_d^{\text{opt}}/P_r = 0,1$ (1); 0,01 (2); 0,001 (3)



На рис. 2 приведены графики отношения $\Delta I'/\Delta I$, где ΔI — величина сигнала, получаемого в случае регулирования мощности P_d с помощью другого способа — выбора коэффициентов β_1 и β_2 , согласно (5). Из рисунка видно, что для обоих типов детекторов в диапазоне соотношений P_d^{opt} и P_r от 10^{-3} до 0,2 такой способ установки мощности P_d^{opt} обеспечивает повышение чувствительности спектрометра в 1,8—2,5 раза по сравнению с регулировкой входным аттенюатором. Из выражений (5, 6) и рис. 2 следует, что в условиях заданного P_r предпочтение надо отдавать такому детекторному диоду, чтобы $P_d^{\text{opt}} = 4/9 P_r$ для квадратичного детектора и $P_d^{\text{opt}} \approx 1/4 P_r$ для линейного, или устанавливать значения β_1 и β_2 , согласно (5) и номограмме.

Учет парамагнитного насыщения. При проявлении эффекта насыщения максимальная чувствительность достигается, если мощность P_p , рассеиваемая в резонаторе, равна мощности насыщения P_p^{opt} . Это соответствует следующим условиям (см. схему на рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} P_d^{\text{opt}} &= \frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_1 + \beta_2 + 1)^2} P_r \\ P_p^{\text{opt}} &= \frac{4\beta_1}{(\beta_1 + \beta_2 + 1)^2} P_r \end{aligned} \right\}$$

Система имеет следующее решение: $\beta_2 = a/b$, $\beta_1 = \left(\frac{2}{b} - \beta_2 - 1 \right) - \frac{2}{b} (1 - \beta_2 b - b)^{1/2}$, $b = \frac{P_p^{\text{opt}}}{P_r}$.

Из номограммы (рис. 3) следует, что оптимальные условия работы спектрометра достигаются, в противоположность предыдущему случаю,

при различающихся между собой значениях β_1 и β_2 . Например, для типичного случая $P_r \approx 50$ мВт, $P_d^{opt} \approx 1$ мВт и $P_p^{opt} \approx 1$ мВт, $\beta_1 = 0,01$, $\beta_2 = 1$. В реальных пределах изменения величин P_r ($10 \div 200$ мВт), P_d^{opt} ($1 \div 10$ мВт) и P_p^{opt} ($0,1 \div 100$ мВт) диапазон оптимальных значений β_2 ($0,01 \div 100$) значительно шире диапазона для β_1 ($0,01 \div 5$). Таким образом, в спектрометре целесообразно предусмотреть регулировку связи со стороны детектора в более широких пределах, чем со стороны генератора.

В спектрометре проходного типа на образец воздействует как магнитная компонента поля стоячей волны H_c , так и компонента H_b бегущей волны, поступающей на детектор. Оценка показывает, что $H_b/H_c = \sqrt{P_d}/\sqrt{QP_p}$ и при значениях $Q \approx 100 \dots 10000$ учет поля становится существенным при $P_d/P_p > 10$.

Автор признателен В. Ф. Стельмаху за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии.— М., 1970, с. 483; 250.
2. Wilmshurst T. H., Gambling W. A., Ingram P. J.— J. Electron. Control, 1962, v. 13, p. 332.

Поступила в редакцию
06.09.82.

Кафедра физики полупроводников

УДК 621.391.24

А. Н. ЛАЗАРЧИК

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ВРЕМЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ В ТЕОРИИ ВЫБРОСОВ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Цель настоящей работы — оценка точности приближения в методе временной дискретизации в зависимости от величины интервала дискретизаций для случая стационарных процессов.

Рассмотрим случайный сепарабельный, стационарный в широком смысле процесс $x(t)$. Будем предполагать, что для него существуют многомерные плотности вероятности любой размерности. Случайный процесс $x(t)$ считается заданным, если для него задан набор многомерных плотностей распределения $\{W_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n)\}$ ($n=1, 2, \dots$), удовлетворяющих условиям симметрии и согласованности [1]. Условие симметрии требует, чтобы функции W_n были симметричны по всем переменным (x_i, t_i) . Условие согласованности выражается соотношением

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_n(x_1, t_1; \dots; x_i, t_i; \dots; x_n, t_n) dx_i = \\ = W_{n-1}(x_1, t_1; \dots; x_{i-1}, t_{i-1}, x_{i+1}, t_{i+1}; \dots; x_n, t_n).$$

Интегральную функцию распределения абсолютного максимума случайного процесса на интеграле времени $(0, T)$ можно определить как вероятность нахождения процесса $x(t)$ ниже некоторого фиксированного уровня h на интервале времени $(0, T)$, т. е. $F(h, T) = P\{\sup_{t \in (0, T)} x(t) < h\}$.

Как отмечалось в [2], значение функции распределения можно определить следующим пределом:

$$F(h, T) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(h, T), \quad (2)$$

где $F_n(h, T)$ — n -мерная интегральная функция распределения процесса, определяемая равенством

$$F_n(h, T) = \int_{-\infty}^h \dots \int_{-\infty}^h W_n(x_1, t_1; \dots; x_n, t_n) dx_1 \dots dx_n. \quad (3)$$