

06;12

Измерение тепловых и электронных параметров полупроводников методом "мираж"-эффект с импульсным возбуждением и раздвоением пробного луча

© А.Н. Петровский, К.В. Лапшин, В.В. Зуев

Московский инженерно-физический институт

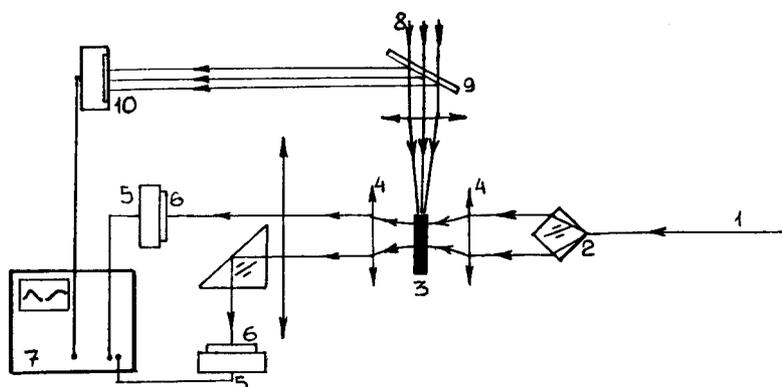
Поступило в Редакцию 13 января 1998 г.

Описана методика, которая обеспечивает качественное увеличение точности определения тепловых и электронных параметров полупроводниковых образцов.

В работе впервые предложена методика использования метода "мираж"-эффект с раздвоением пробного луча, показаны преимущества данной методики, позволяющие качественно повысить точность определения тепловых и электронных параметров (в том числе для выявления скрытых дефектов, определения качества обработки поверхности, наличия микротрещин примесных уровней и пр.) при сканировании поверхности образцов, приведены экспериментальные результаты коэффициентов температуропроводности и скоростей распространения максимума градиента коэффициента преломления тепловой волны в исследуемых образцах.

Возможность измерения тепловых и электронных параметров полупроводников методом "мираж"-эффект с импульсным возбуждением — особенно перспективным благодаря своему локальному, неразрушающему, бесконтактному характеру — была показана в ряде зарубежных и отечественных работ [1–4].

Факторами, определяющими точность метода, являются неоднородность облучения образца возбуждающим излучением от импульса к импульсу, а также точность измерения вхождения пробного луча в образец.



Экспериментальная схема, предложенная в работе (см. рисунок), позволяет успешно решить обе эти проблемы, значительно повысив точность и быстродействие метода.

Пробный луч от He-Ne лазера (1) подавался на грань делительного кубика (2), на котором раздваивался. Два вновь образованных пробных луча сканировали образец (3), находящийся в телескопической системе (4), на глубинах x_1 и x_2 .

Образец помещался на юстировочном столике с микронной подачей по вертикальной и горизонтальной оси (с точностью подачи $10 \mu\text{m}$), расположенном внутри телескопической системы. Двойная подача юстировочного столика позволяла варьировать как глубины вхождения пробных лучей в образец, так и расстояние между пробными лучами в образце (Δx) путем удаления и приближения к перетяжке (естественно, что горизонтальное смещение должно быть не велико, в противном случае диаметр пробного луча в образце станет соизмерим с глубиной сканирования и пробный луч нельзя будет считать однородным).

Отклонение пробных лучей, прошедших телескопическую систему, регистрировалось двухпозиционными фотодиодами (5), защищенными от паразитного излучения кремниевыми фильтрами (6).

Сигналы с фотодиодов поступали на двухлучевой цифровой программируемый осциллограф С9-16 (7), позволяющий визуально сравнивать, а также обрабатывать с использованием функции программирования

импульсной фотодефлекционной спектроскопии (ИФДС) сигналы с обоих пробных лучей, снятые одновременно за один возбуждающий импульс (8, 9, 10).

По снятым за один лазерный импульс возбуждающего излучения формам ИФДС-сигналов рассчитывались значения коэффициентов температуропроводности (D_t) и скорости распространения тепловой волны в образцах.

Выразив D_t через разность времен положений тепловых максимумов ИФДС-сигналов с обоих пробных лучей Δt глубину сканирования пробного луча, расположенного дальше от поверхности сигнала x_2 , и расстояние между пробными лучами в образце Δx , в простейшем приближении [1] имеем

$$D_t = \Delta x \cdot x_2 (1 - \Delta x / 2x_2) / 3\Delta t. \quad (1)$$

Из (1) видно, что погрешность определения D_t зависит от погрешности определения Δx , Δt и x_2 — $\delta(\Delta x)_{\text{тво}}$, $\delta(\Delta t)_{\text{тво}}$ и $\delta(x_2)_{\text{тво}}$ соответственно.

Параметр Δt в предложенной схеме не зависит от неоднородности облучения образца возбуждающим излучением, что позволяет увеличить точность его определения с 20% (традиционный "мираж"-эффект) до 2%.

Основным параметром, влияющим на точность измерения глубины сканирования x_2 , является диаметр пробного луча внутри образца (он должен быть значительно меньше глубины сканирования — в противном случае следует учитывать неоднородность отклонения различных частей пробного луча по глубине). В данном эксперименте фокусное расстояние линз телескопа составляло 3 см, толщина образца — около 2 мм, диаметр пробного луча на входе оптической системы составлял около 2 мм.

Лазерное излучение на входе и выходе образца можно было наблюдать через прибор ночного видения визуально; диаметр пробных лучей на входе и выходе из образца составлял $70 \mu\text{m}$, внутри образца распределение лазерного пучка сохраняло гаусов профиль [5]. Физическое ограничение, накладываемое на перетяжку пробного луча, составляло $20 \mu\text{m}$ [5]. Глубина сканирования x_2 выбиралась максимально возможной и составляла $450 \mu\text{m}$, являясь, таким образом, значительно большей диаметра пробного луча внутри образца. Погрешность $\delta(x_2)_{\text{тво}} \sim 6\%$ (как и в традиционной схеме).

В предложенной схеме расстояние между двумя сканирующими пробными лучами Δx не зависит от вертикального перемещения образца. Погрешность $\delta(\Delta x)_{two} \sim 2\%$, в то время как в традиционной схеме погрешность задавалась глубиной сканирования x_1 , точностью подачи юстировочного столика и неоднородностью освещения поверхности образца возбуждающим лазерным излучением — $\delta(x_1)_{one} \sim 10\%$.

Таким образом, погрешность определения D_t за одно измерение при использовании метода с раздвоением пробного луча $\delta(D_t)_{two} \sim 10\%$, что значительно меньше погрешности определения D_t с использованием традиционной схемы — $\delta(D_t)_{one} \sim 40\%$. Кроме того, возможность измерения параметров образцов за один возбуждающий импульс существенно повышает быстродействие метода.

Показанные выше преимущества методики использования двойного пробного луча делают ее особенно удобной при сканировании тепловых и электронных параметров образца по поверхности образца (в том числе для определения качества обработки поверхности, наличия микротрещин, примесных уровней и пр.).

Отметим как еще одно возможное применение метода раздвоения пробного луча использование схемы, в которой возбуждающий луч и раздвоенные пробные лучи направлены параллельно. С помощью такой схемы удобно выявлять скрытые в образце дефекты.

В работе исследовались полированные кремниевые образцы со степенью обработки поверхности $1-2 \mu\text{m}$, вследствие чего скоростью поверхностной рекомбинации можно пренебречь [2], и с временами жизни неосновных носителей $170 \mu\text{s}$ (p -типа), $0.7 \mu\text{s}$ (n -типа).

Коэффициенты температуропроводности для исследуемых образцов составили соответственно $1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ для кремниевого образца n -типа (табличное значение — $1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ [6]) для всех серий и $0.9-1.4 \text{ cm}^2/\text{s}$ для кремниевого образца p -типа (табличное значение — $1.2 \text{ cm}^2/\text{s}$ [6]) для всех серий.

В работе также исследовались скорости распространения максимумов градиентов коэффициента преломления тепловых волн в исследуемых образцах (V_t), теоретическое обоснование которой дается в работе [7]. Благодаря относительному характеру измерений погрешность $\delta(V_t)_{two}$ составляла около 4%, что значительно меньше погрешности традиционного метода — $\delta(V_t)_{one} \sim 30\%$. Скорость распространения максимума градиента коэффициента преломления тепловой волны составила 53 cm/s в кремниевом образце p -типа с $\tau = 170 \mu\text{s}$ и 98 cm/s в кремниевом образце n -типа с $\tau = 0.7 \mu\text{s}$.

Список литературы

- [1] Зувев В.В., Мехтиев М.М., Мухин Д.О. и др. Препринт МИФИ № 031-90. М., 1990. 24 с.
- [2] Petrovsky A.N., Salnick A.O., Zuev V.V. et al. // Solid State Comm. 1992. V. 81. N 3. P. 223–225.
- [3] Лапшин К.В., Петровский А.Н., Зувев В.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 1. С. 24–28.
- [4] Лапшин К.В., Петровский А.Н., Зувев В.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 21. С. 60–64.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1988. 512 с.
- [6] Акустические кристаллы / Под ред. Шаскольского М.П. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1982. 632 с.
- [7] Мехтиев М.М., Зувев В.В., Петровский А.Н. Препринт МИФИ № 014-96. М., 1996. 40 с.