

*Ю. Е. ГОРДИЕНКО, Б. Г. БОРОДИН, В. И. КРИВОРУЧКО***О СИНТЕЗЕ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОТОМОДУЛЯЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

Заметным достижением в развитии микроволновой диагностики полупроводниковых материалов явилось создание СВЧ фотомодуляционного метода контроля параметров эпитаксиальных структур [1—4]. В числе несомненных достоинств этого метода, таких как безэлектродность измерений и их неразрушающий характер, безусловно, следует назвать также его универсальность (то есть применимость для определения большинства электрофизических параметров полупроводниковой слоистой структуры [4—7]) и легко реализуемую возможность высоколокальных измерений. В то же время необходимо отметить, что наряду с принципиальной проработанностью основных положений фотомодуляционного метода в литературе практически отсутствуют сведения о выборе оптимальных технических решений при создании устройств, основанных на использовании фотомодуляционного метода. Некоторые аспекты синтеза измерительных преобразователей для таких устройств рассмотрены в настоящей статье. При этом круг исследуемых вопросов ограничивается рамками разработанного авторами [2; 4] метода двухпараметрового контроля (толщины h и электропроводности σ) полупроводниковых пластин и эпитаксиальных пленок в структурах с высокоомными подложками.

Теоретической основой для развития указанного метода явились исследования возмущения H_{01n} мод цилиндрического СВЧ резонатора аксиально расположенным фотопроводящим полупроводниковым диском. При этом исследуемый образец, как показано на рис. 1, а, размещается внутри резонатора, состоящего из двух соосных частей, перпендикулярно его оси, полностью перекрывая поперечное сечение резонатора. Сущность метода заключается в исследовании гармонического сигнала фотопроводимости, измеренного при СВЧ смещении, в зависимости от уровня включения

образца в поле резонатора и регистрации таких уровня включения и резонансной частоты или длины резонатора, при которых сигнал фотопроводимости (ФП) переходит через нуль, изменяя знак. Вариация включения производится посредством перестройки резонатора одним поршнем, а подстройка резонатора в резонанс — вторым поршнем или изменением частоты питающего СВЧ генератора. Подробно основные теоретические соотношения, методика измерения, схемы экспериментальных установок приведены в работе [4]. Там же обоснована предпочтительность выбора в качестве сигналов измерительной информации положения настроенного поршня в момент смены знака сигнала фотопроводимости H_{\pm} и соответствующей этому положению резонансной частоты СВЧ резонатора (ω_{\pm}).

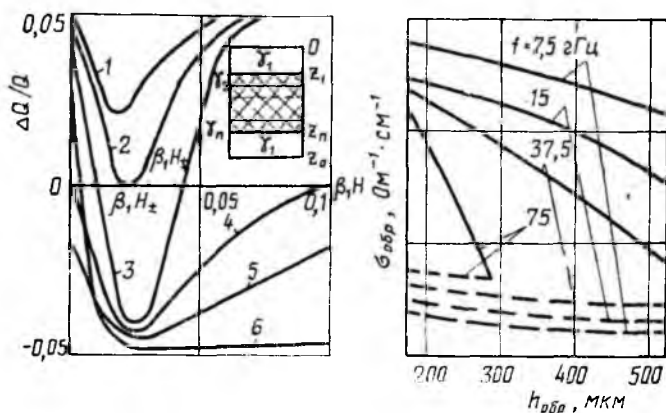


Рис. 1

На рис. 1, а приведены рассчитанные в соответствии с рекомендациями работы [4] примеры типичных зависимостей сигнала ФП ($\frac{\Delta Q}{Q}$) от уровня включения (β, Hz) образцов кремниевых пластин (подложек) в поле цилиндрического СВЧ резонатора с H_{012} видом колебаний. Анализ приведенных зависимостей показывает, что исследуемый сигнал ФП может быть по амплитуде как положительным, так и отрицательным, т. е. с увеличением тангенса угла потерь $tg \delta_{обр}$ пластины при освещении добротность резонатора может не только уменьшаться, а и возрастать. Это явление объясняется различным характером перераспределения электромагнитного поля между частями резонатора, заполненными и незаполненными полупроводником в зависимости от уровня включения [2; 4]. С метрологической точки зрения существенный интерес представляет то обстоятельство, что два значения $\beta_1 H_{\pm}$, ограничивающих область с отрицательным сигналом ФП, и резонансная частота резонатора при указанных уровнях включения однозначно зависят от таких параметров образца, как $tg \delta_{обр}, h_{обр}, \epsilon_{обр}$. Исследования показали, что положение отмечен-

ных точек типа $\beta_1 H_+$ и $\beta_1 H_-$ (рис 1, а) не зависит для конкретного образца от параметров СВЧ детектора, мощности СВЧ генератора и уровня фотовозбуждения вплоть до $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{обр}} \ll 0,1$, а определяется только $\text{tg } \delta_{обр}$ и $h_{обр}$.

Авторами работ [2—7] обоснована целесообразность использования для реализации фотомодуляционного метода цилиндрического резонатора с H_{012} — видом колебаний. В то же время синтез оптимального измерительного преобразователя предполагает определение в зависимости от параметров образцов целого ряда его основных характеристик. К их числу следует отнести диапазон измерений толщины и электропроводности образцов; рабочую частоту измерительного преобразователя; чувствительность выходных сигналов измерительной информации к изменению контролируемых параметров; предельно достижимую локальность и некоторые другие.

Для исследований был выбран диапазон миллиметровых и сантиметровых длин волн. Верхняя граница выбранного диапазона определяется областью, где еще заметно не проявляются инерциальные эффекты, а нижняя — обусловлена необходимостью обеспечения приемлемой локальности контроля. Численно ограничение по локальности описывается соотношением:

$$\omega \geq \frac{\pi \cdot C}{0,21 \cdot \theta^2 \cdot D}, \quad (1)$$

где $\theta = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2$; D — диаметр апертуры измерительного преобразователя. В частности, с учетом высказанных соображений при расчете зависимостей, приведенных на рис. 1, а, рабочая частота была выбрана равной 37,5 ГГц.

Анализ этих зависимостей дает возможность сделать вывод, что в широком диапазоне значений $\text{tg } \delta_{обр}$ перераспределение поля между образцом и резонатором приводит к существенной зависимости сигнала ФП от уровня включения. Однако лишь начиная с $\text{tg } \delta_{обр} > \text{tg } \delta_{min}$ (кривая 3) проявляется область с отрицательным значением сигнала ФП. Указанное значение $\text{tg } \delta_{обр}$ позволяет говорить о нижнем пределе диапазона контролируемых величин ($\text{tg } \delta_{min}$). В то же время для пластин с $\text{tg } \delta_{обр} > \text{tg } \delta_{max}$ (кривая 4) преобладающее влияние экранирующих свойств образца приводит к тому, что область отрицательных значений сигнала ФП начинается непосредственно с $\beta_1 H = 0$, т. е. начального уровня включения. И, таким образом, диапазон контролируемых $\text{tg } \delta_{обр}$ ограничивается сверху.

На рис. 1, б представлены результаты расчета таких предельных значений $\text{tg } \delta_{обр}$ и $h_{обр}$ (сплошные кривые — верхний предел диапазона измерения; пунктирные кривые — нижний предел диапазона измерения) кремниевых пластин для различных значений рабочей частоты. Очевидно, что с уменьшением частоты границы диапазона, подлежащих контролю параметров, расширяются. При этом следует отметить, что верхняя граница может быть несколько отодвинута в сторону боль-

ших значений $\text{tg} \delta_{\text{обр}}$, $h_{\text{обр}}$, если в качестве выходного сигнала измерительной информации использовать второе значение $\beta_1 H_{\pm}$, при котором сигнал ФП меняет знак с отрицательного на положительный. В то же время относительно невысокое значение параметра $\frac{\partial (\Delta Q/Q)}{\partial H}$, характеризующее величину и скорость измерения сигнала ФП с изменением уровня включения, приводит в этом случае к существенному возрастанию погрешности измерений. И, очевидно, что использование этой второй точки смены знака сигнала ФП в качестве информационной характеристики имеет смысл лишь для наиболее высокоомных образцов из числа тех, у которых положительный сигнал ФП отсутствует при начальном уровне включения.

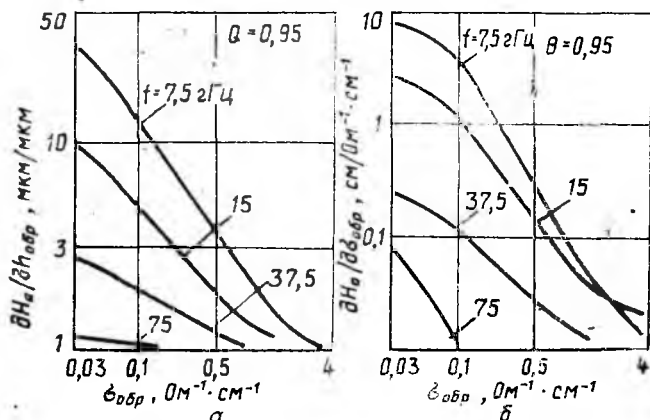


Рис. 2

Для расчета дифференциальной чувствительности измерения величин $\text{tg} \delta_{\text{обр}}$ и $h_{\text{обр}}$ использовалось то же исходное соотношение [4], что и при выводе зависимостей, представленных на рис. 1, а. Результаты такого расчета приведены на рис. 2, а, б, где $h_{\text{обр}} = 250 \text{ мкм}$. Их анализ показывает, что чувствительность падает с увеличением $\text{tg} \delta_{\text{обр}}$. Можно отметить, что для высокоомных образцов ($\text{tg} \delta_{\text{обр}} < 2$, $f = 37.5 \text{ ГГц}$) характер такой зависимости — линейный, причем угол наклона линейного участка определяется толщиной образца. С уменьшением рабочей частоты чувствительность возрастает, однако при этом происходит ухудшение локальности контроля.

Обобщая вышесказанное, нетрудно сделать вывод, что конструирование H_{01n} измерительного преобразователя для фотомодуляционной диагностики полупроводниковых материалов представляется наиболее целесообразным в частотном диапазоне $15 \text{ ГГц} \div 37.5 \text{ ГГц}$. При таких значениях рабочей частоты границы области подлежащих контролю значений $\text{tg} \delta_{\text{обр}}$ и $h_{\text{обр}}$ ($0.13 < \text{tg} \delta_{\text{обр}} < 8$, $200 < h_{\text{обр}} < 500 \text{ мкм}$) перекрывают наиболее интересные в практическом отношении классы полупроводниковых пластин типа КЭФ-0,3 ÷ 30, КДБ-0,3 ÷ 30 и других. Характерный размер апертуры измерительного отверстия, легко определяемый при

помощи соотношения (1), в этом случае не превысит значение 2 см. А чувствительность измерений толщины и электропроводности составит во всем диапазоне контролируемых параметров 5—8 %.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при разработке измерительного преобразователя, позволяющего оптимальным образом выделять сигнал ФП при СВЧ смещении, является условие существенного превышения собственной добротности ненагруженного СВЧ резонатора над добротностью СВЧ резонатора с полупроводниковым образцом ($Q_0 \gg Q$). С целью выяснения вопросов выполнимости этого условия были проведены расчеты добротности H_{012} — резонатора, нагруженного образцом полупроводниковой пластины, при уровнях включения, соответствующих смене знака сигнала ФП, на границах измерительного диапазона.

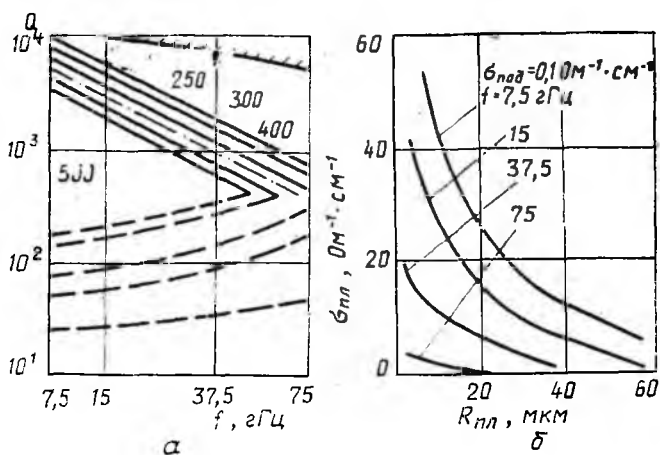


Рис. 3

На рис. 3, а представлены результаты таких численных исследований (— — добротность у верхнего предела диапазона измерений; - - - - добротность у нижнего предела); $h_{обр} = 200$ мкм.

Значения Q и $\dot{\gamma}$ рассчитывались по выражению [4]

$$Q = \frac{\omega'}{2 \cdot \omega''}; \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{-\dot{\omega}^2 \cdot \epsilon \cdot \mu_0 - \left(\frac{v_{01}}{R}\right)^2}, \quad (3)$$

где $\dot{\omega} = \omega' + j\omega''$.

На этом же рисунке приведена частотная зависимость ненагруженной добротности резонатора (кривая ////), определенная при помощи соотношения

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \lambda_B} \left[\frac{R_s}{a \cdot \rho_0} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda} \left(\frac{m^2}{u_{пл} - m^2} + \theta \right) + \frac{R_s \cdot \epsilon_p}{2 \rho_H \cdot \lambda_B} \right]. \quad (4)$$

Анализ указанных зависимостей Q_0 и Q позволяет заключить, что для нижней границы измерительного диапазона условие $Q_0 \gg Q$ выполняется при всех значениях частоты от 7,5 до 75 ГГц. Для верхней границы неравенство ослабевает с понижением частоты (физически это означает усиление влияния экранирующих свойств образца). Восстановить соотношение между Q и Q_0 можно, несколько уменьшив Θ (кривая — — на рис. 3, а).

Аналогичная методика применялась и при исследовании измерительного преобразователя для фотомодуляционного контроля кремниевых и арсенидогаллиевых пленок на высокоомных подложках. Важной особенностью измерений в структурах GaAs с полуизолирующей подложкой является отсутствие заметного влияния подложки на погрешность измерений параметров пленки. Для подложек с $\text{tg } \delta_{\text{под}} \leq 0,05$ отклонение этой величины на $\pm 10\%$ увеличивает погрешность измерений на величину, не превышающую $\pm 1\%$.

На рис. 3, б представлены типичные зависимости положения верхней границы измерительного диапазона для кремниевых $p-n$ структур на разных частотах. Здесь $h_{\text{под}} = 300$ мкм.

Как следует из проведенного анализа, стремление расширить диапазон подлежащих контролю значений $\text{tg } \delta_{\text{обр}}$ и $h_{\text{обр}}$, обеспечить высокую чувствительность, оптимизировать условия выделения сигнала ФП приводит к необходимости снижения рабочей частоты. Однако при этом возрастают геометрические размеры самого резонатора и соответственно ухудшается локальность контроля.

Решением возникшего противоречия может явиться использование в качестве ИП резонатора коаксиального типа с ТЕМ видом колебаний. Как известно, у поперечной электромагнитной волны критическая длина волны в коаксиальном волноводе равна нулю. И в диапазоне $\lambda_{\text{НП}} < \lambda \leq \infty$ этот тип волны является низшим. Это дает возможность проектировать резонатор с малыми поперечными размерами, и одновременно, что немаловажно, освободиться от паразитных видов колебаний.

Для одномодового приближения, когда рассматривается установившийся режим вынужденных колебаний волны только данного типа без возникновения дифракционных явлений и комбинационных колебаний, распределение электромагнитного поля в различных частях цилиндрического резонатора (рис. 1, а) описывается характеристическим уравнением. Для однослойного образца оно имеет вид:

$$\text{th}(\gamma_1 \cdot z_1) = -\frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\text{th}(\gamma_2 \cdot h_2) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \text{th}(\gamma_1 \cdot H)}{1 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \text{th}(\gamma_2 \cdot h_2) \text{th}(\gamma_1 \cdot H)}; \quad (5)$$

$$\gamma_i = \sqrt{-\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_i \cdot \mu_i \cdot \omega^2}, \quad (6)$$

где $\rho_i = \sqrt{\frac{\epsilon_i}{\mu_i}}$.

Исследования показывают, что коаксиальному резонатору также свойственен эффект смены знака сигнала фотопроводимости. И этот тип ИП с успехом может использоваться для диагностики полупроводников. Основные параметры этого ИП аналогичны ИП с H_{01n} видом колебаний.

Диапазон возможного изменения f практически составляет от 10 ГГц до 1 ГГц и ниже.

Численный анализ изменения характеристик резонатора (добротности Q , изменения частоты $\Delta\omega$ и сигнала фотопроводимости), полученных с помощью характеристического уравнения (5), позволяет сделать вывод, что они имеют некоторые особенности по сравнению с аналогичными характеристиками резонатора H_{01n} типа. Так, например, величины сигнала ФП (кривая 6, рис. 1, а) и добротности Q с увеличением уровня включения $\beta_1 N$ уменьшаются, но достигают очень пологого экстремума. Другая особенность связана с тем, что величины добротности Q , особенно вблизи нижнего предела измерений, имеют весьма низкое значение.

Проведенный анализ подтвердил возможность использования такого резонатора для двухпараметрового контроля полупроводниковых пластин и эпитаксиальных структур. При этом диапазон измерений значительно расширяется в область высоких значений $\text{tg } \delta_{\text{обр}}$ при сохранении условия $Q_0 \gg Q$.

Сравнивая результаты, полученные для случаев цилиндрического H_{012} и коаксиального резонаторов, можно сделать вывод о предпочтительности использования последнего именно для контроля низкоомных образцов. В частности, при измерении толщины и электропроводности полупроводниковых пластин диапазон значений $\text{tg } \delta_{\text{обр}}$, подлежащих контролю с помощью H_{012} резонатора, составляет $\text{tg } \delta_{\text{обр}} \leq 60$ при $f = 7,5$ ГГц, а с помощью коаксиального резонатора $\text{tg } \delta_{\text{обр}} \leq 4,5 \cdot 10^3$ при $f = 1$ ГГц.

С целью более полного анализа возможностей ИП двух указанных типов представляется целесообразным рассмотреть возможность уменьшения апертуры измерительного отверстия H_{012} резонатора за счет применения диэлектрических вставок. Применение вставок, выполненных из материала с $\epsilon = 2 \div 6$, позволяет уменьшить диаметр измерительного отверстия до 1 см при рабочей частоте 5—10 ГГц. При этом использование ИП с такими вставками обеспечивает измерение параметров низкоомных образцов с $\text{tg } \delta_{\text{обр}} < 2 \cdot 10^2$.

Список литературы: 1. Воробейчиков Э. С., Наливайко Б. А. Фотомодуляционный бесконтактный метод измерения удельного сопротивления высокоомных пленок // Электрон. техника. 1971. Сер. 12, вып. 1(7). С. 39—42. 2. Гордиенко Ю. Е. Определение характеристик объемных резонаторов со слоистым заполнением // Радиотехника. 1982. Вып. 60. С. 17—23. 3. Cummings K. D., Pearton S. I., Vella-Cobira G. P. Characterization of Ga AS and Si by microwave Photoconductance technique // I. Appl. Phys., Sept. 1986, Vol. 60(5), № 1. P. 1676—1680. 4. Гордиенко Ю. Е., Бородин Б. Г., Криворучко В. И. Возмущение H_{01n} мод цилиндрического резонатора аксиально расположенным фотопроводящим полупроводниковым диском // Радиотехника. 1991. Вып. 97. С. 82—91. 5. Гордиенко Ю. Е. Об одном методе СВЧ-диагностики полупроводников // Радиотехника. 1977. Вып. 40. С. 104—108. 6. Установка для безэлектродного измерения времени жизни носителей за-

ряда в полупроводниках // Ю. Е. Гордиенко, Ю. А. Дудкин, Б. Г. Бородин, Д. А. Федотов // Приборы и техника эксперимента. М., 1988. № 2. С. 204—207.
7. Гордиенко Ю. Е., Бородин Б. Г. Бесконтактное измерение подвижности носителей заряда в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента. М., 1984. № 1. С. 189—196.

Поступила в редколлегию 20.07.90