

УДК 621.315.592

## УПРАВЛЯЕМЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

© 2011 г. В. М. Владимиров, В. Г. Коннов, В. В. Марков, Н. С. Репин, В. Н. Шепов

*Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской АН**e-mail: vlad@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 22.10.2010 г.

Кратко описан оригинальный управляемый СВЧ-модуль для бесконтактного измерения параметров полупроводников. Модуль позволяет в автоматическом режиме контролировать изменение частоты, амплитуды, добротности и формы резонансной кривой СВЧ-резонатора при нагружении его на измеряемый полупроводник. Приведены результаты применения СВЧ-модуля для измерений времени жизни неравновесных носителей заряда в пластинах монокристаллического и мультикристаллического кремния.

### ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактный сверхвысокочастотный (СВЧ) метод измерения времени жизни неравновесных носителей заряда (ВЖ ННЗ) в полупроводниках известен довольно давно [1, 2]. Рассмотрена теория и физические основы метода [3–9], предложены технические решения [10–16], обеспечивающие измерение ВЖ ННЗ бесконтактным СВЧ-методом.

С развитием технологий получения мультикристаллического и монокристаллического кремния возникла необходимость в универсальном бесконтактном измерителе времени жизни неравновесных носителей заряда, позволяющем измерять более широкий диапазон ВЖ ННЗ, включающий ВЖ ННЗ как для монокристаллического, так и для мультикристаллического кремния. Кроме того, возникла необходимость в автоматизации бесконтактного СВЧ-метода и применении современной элементной базы, позволяющей значительно уменьшить размеры измерительных приборов. Все это потребовало решения нескольких задач.

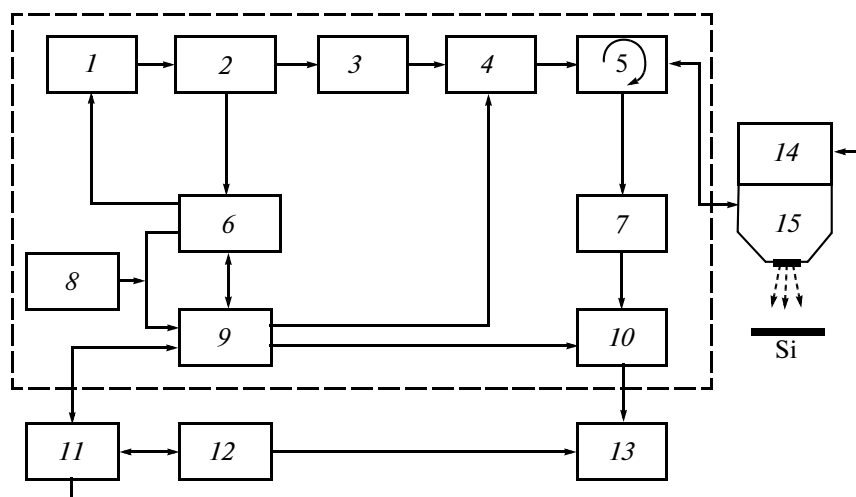
Одна из задач диктуется необходимостью автоматического согласования частоты СВЧ-генератора с частотой СВЧ-резонатора, в пучность СВЧ-электрического поля которого помещается измеряемый полупроводник. Согласование необходимо обеспечить в широком диапазоне удельных электросопротивлений (УЭС) полупроводников, включая характерные значения УЭС для мультикристаллического и монокристаллического кремния. Для отладки технологии получения мультикремния часто необходимо измерять ВЖ ННЗ от 0.1 мкс на образцах с разбросом УЭС от 0.1 до 10 Ом см. В то же время для контроля ВЖ ННЗ монокристаллического кремния необходим измеритель, способный из-

мерять ВЖ ННЗ миллисекундного диапазона на образцах с УЭС более 1000 Ом см.

В первоначальных измерителях СВЧ-генераторы, как правило, разрабатывались на диодах Ганна. СВЧ-резонаторы выполнялись на основе волноводных линий передачи. Связь СВЧ-резонатора с измеряемым образцом полупроводника обеспечивалась либо через отверстие в стенке волновода [10–13], либо через индуктивный штырь в запердельном волноводе [14–16]. Согласование частот осуществлялось с помощью подстроечного винта вручную [10, 11, 14–16]. Такое техническое решение затрудняло дальнейшую автоматизацию измерений ВЖ ННЗ.

Применение автогенераторных схем для измерения ВЖ ННЗ бесконтактным СВЧ-методом [17] позволяет автоматически контролировать частоту и величину минимума отраженной от полупроводника СВЧ-мощности. Однако в таких схемах невозможно контролировать форму резонансной кривой, что необходимо при измерениях ВЖ ННЗ на низкоомных полупроводниковых образцах. При измерении ВЖ ННЗ на таких образцах добротность основной моды колебаний СВЧ-резонатора, на которой проводятся измерения, значительно уменьшается, что приводит к нестабильности работы автогенератора. Поэтому для измерений ВЖ ННЗ бесконтактным СВЧ-методом предпочтительнее схема с управляемой разверткой частоты генератора с дальнейшей визуализацией резонансной кривой [18, 19]. Такое решение позволяет контролировать изменение добротности нагруженного на полупроводник СВЧ-резонатора и устранять искажения резонансной линии для повышения точности измерений ВЖ ННЗ.

Другая задача, возникающая при автоматизации измерений ВЖ ННЗ в полупроводниках бесконтактным СВЧ-методом, обусловлена значительной



**Рис. 1.** Блок-схема измерителя: 1 – генератор, управляемый напряжением (ГУН); 2 – делитель мощности; 3 – СВЧ-усилитель; 4 – управляемый аттенуатор; 5 – циркулятор; 6 – синтезатор частоты; 7 – датчик мощности; 8 – опорный генератор; 9 – программируемая логическая интегральная схема; 10 – операционный усилитель; 11 – плата управления; 12 – персональный компьютер; 13 – АЦП; 14 – лазерный диод; 15 – СВЧ-резонатор.

разницей как в уровне отраженной СВЧ-мощности от низкоомных и высокоомных образцов полупроводника, так и в изменении данного уровня при воздействии на полупроводник импульсного лазерного излучения. Один из вариантов решения данной проблемы заключается в измерении ВЖ ННЗ на высокоомных образцах методом проходящей СВЧ-мощности (“на проход”), а на низкоомных методом отраженной СВЧ-мощности (“на отражение”) [20].

В данной работе для измерений в широком диапазоне ВЖ ННЗ и УЭС кремния по отраженной СВЧ-мощности предлагается применить специально разработанную конструкцию СВЧ-резонатора, обеспечивающую высокую его чувствительность к минимальным изменениям отраженной от полупроводника СВЧ-мощности [21].

Целью настоящей работы является разработка управляемого СВЧ-модуля для автоматизированного измерителя времени жизни неравновесных носителей заряда в пластинах мульткристаллического и монокристаллического кремния бесконтактным СВЧ-методом. Измерения должны выполняться в едином режиме “на отражение”.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ СВЧ-МОДУЛЯ

На рис. 1 приведена блок-схема измерителя, штриховой линией показан состав СВЧ-модуля, спроектированного по принципу цифровой фазовой автоподстройки частоты генератора, управляемого напряжением (ГУН).

СВЧ-модуль работает следующим образом. Команда управляющей программы с персонального компьютера (12) через USB-порт поступает на плату управления (11). Контроллер платы управления ко-

ординирует работу программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) (9) и схемы управления излучением лазерного диода. ПЛИС управляет работой схемы синтезатора частоты (6), цифрового аттенуатора (4) и операционного усилителя (10).

ГУН (1) формирует СВЧ-сигнал ( $F_c$ ) в диапазоне частот от 4800 до 5300 МГц. С ГУНа СВЧ-сигнал поступает на делитель мощности (2), с которого часть сигнала поступает на двухкаскадный усилитель СВЧ (3), а часть на цифровой синтезатор частоты (6). На другой вход синтезатора поступает сигнал с частотой 100 МГц ( $F_{оп}$ ) с опорного генератора (8).

Частота сравнения  $F_c/N$  и  $F_{оп}/n$  составляет 100 кГц. Деление частот осуществляется встроенными делителями частоты. Причем  $N$  – переменный (управляемый) коэффициент деления, а  $n$  – постоянный.

На выходе частотно-фазового детектора (ЧФД), входящего в состав синтезатора частоты, формируется сигнал управления, зависящий от разности фаз сравниваемых сигналов  $F_c/N$  и  $F_{оп}/n$ . Напряжение с выхода ЧФД поступает через усилитель постоянного тока и фильтр нижних частот на вход управления ГУНа и стабилизирует заданную частоту.

С выхода усилителя (3) СВЧ-мощность поступает на управляемый аттенуатор (4), и, далее, через циркулятор (5) на СВЧ-резонатор (15), нагруженный на измеряемый образец полупроводника. Для измерений ВЖ ННЗ в широком диапазоне УЭС-кремния мощность СВЧ-модуля можно регулировать в пределах 0.01–100 мВт с помощью цифрового аттенуатора.

Отраженный от полупроводника СВЧ-сигнал через циркулятор (5) поступает на датчик мощности (7). Далее продетектированный сигнал усиливается

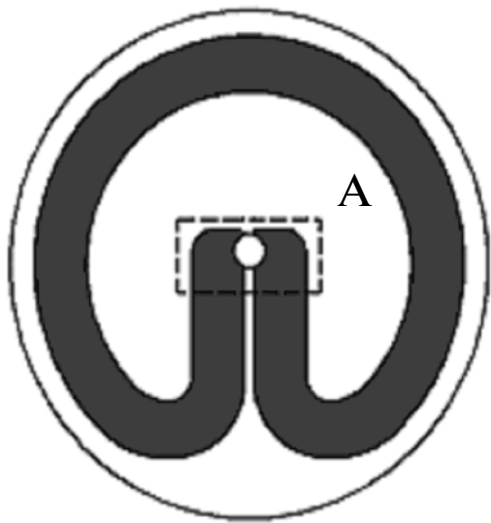


Рис. 2. Топология полоскового проводника МПР.

операционным усилителем с управляемым коэффициентом усиления ( $10$ ). С помощью последовательного кода, поступающего с ПЛИС, коэффициент усиления может изменяться от 1 до 20, что обеспечивает усиление информационного сигнала до уровня, необходимого для работы двенадцатиразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ( $13$ ). Максимальная частота дискретизации АЦП составляет 100 МГц, объем буфера памяти 1024 кСлов. Данные параметры АЦП позволяют измерять всю кривую спада фотопроводимости за один импульс лазерного излучения даже при значениях ВЖ ННЗ порядка 0.1 мкс.

СВЧ-резонатор, обеспечивающий связь СВЧ-генератора с измеряемым образцом полупроводника, выполнен в виде микрополоскового резонатора (МПР) и работает в режиме “на отражение”. На рис. 2 приведена топология полоскового проводника МПР. Противоположные концы полоскового про-

водника, на которых находятся в противофазе пучности высокочастотного электрического поля, сведены вместе через зазор [21]. Чувствительность такого СВЧ-резонатора значительно выше приведенного в [18], что приводит к повышению точности измерений. Это происходит потому, что в таком СВЧ-резонаторе силовые линии высокочастотного электрического поля замкнуты не только между проводящим полосковым проводником и экраном, но и между противофазными концами полоскового проводника, на которые воздействует измеряемый полупроводник. Между концами полоскового проводника выполнено сквозное отверстие, через которое проходит излучение лазерного диода, закрепленного с другой стороны СВЧ-резонатора. Данная область показана на рисунке штриховой линией. Длина волны излучения лазерного диода 1.06 мкм, предельная мощность непрерывного излучения 500 мВт.

Конструктивно МПР выполнен таким образом, что измеряемый полупроводник воздействует не на весь СВЧ-резонатор целиком, а только на область резонатора “А”.

После установления оптимальной связи между СВЧ-резонатором и измеряемым образцом кремния по команде управляющей программы импульс лазерного излучения заданной длительности и мощности проходит через сквозное отверстие резонатора и возбуждает ННЗ в полупроводнике. Спад фотопроводимости фиксируется через зависимость изменения амплитуды резонансной линии СВЧ-резонатора от времени. Далее по участку спада фотопроводимости определяется эффективное ВЖ ННЗ и рассчитывается объемное.

На рис. 3 приведены частотные зависимости отраженной СВЧ-мощности от СВЧ-резонатора, нагруженного на образцы кремния, кривые (а) и (б), где  $F$  – частота сигнала с СВЧ-модуля. Кривые соответствуют образцам № 1 и № 2, представляющим собой пластины монокристаллического и мультикристаллического кремния  $n$ -типа толщиной 6 мм и 3 мм со-

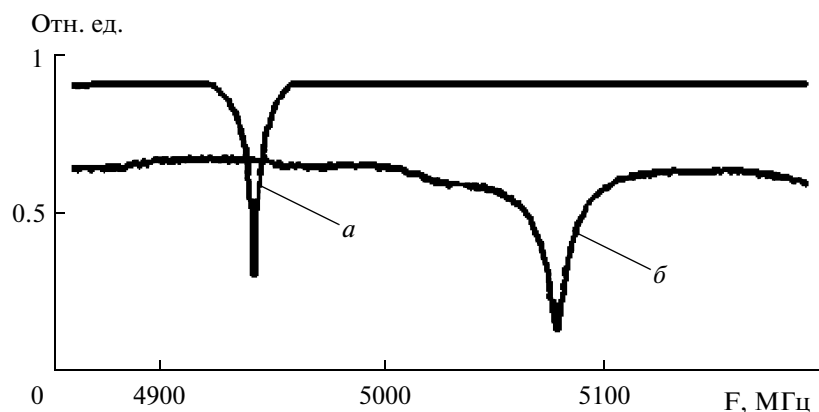


Рис. 3. Частотная зависимость отраженной СВЧ-мощности от монокристаллического – (а) и мультикристаллического – (б) образцов.

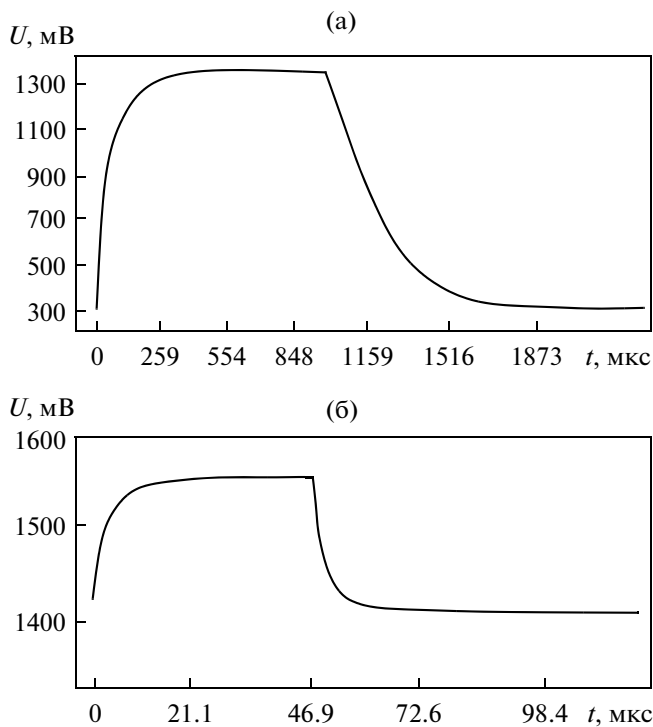


Рис. 4. Временные зависимости фотопроводимости для образцов № 1 – а; № 2 – б.

ответственно. Величина УЭС для образца № 1 равна 2500 Ом см, для образца № 2 0.05 Ом см. Из рисунка видно, что разработанный СВЧ-модуль с применением специальной конструкции СВЧ-резонатора позволяет уверенно фиксировать отраженную СВЧ-мощность в диапазоне УЭС кремния от 0.05 до 2500 Омсм. Этот диапазон не является предельным для данного СВЧ-модуля.

Для более детального просмотра резонансной линии диапазон частот СВЧ-модуля возможно произвольно изменять (в пределах 4800–5300 МГц). Шаг перестройки частоты дискретный, минимальное значение 0.1 МГц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 4 приведены измеренные временные зависимости нарастания и спада фотопроводимости для образца № 1 (верхний рисунок) и № 2 (нижний рисунок). Результаты для образца № 1 получены при мощности СВЧ-модуля 2 мВт, единичном импульсе лазерного излучения мощностью 30 мВт и длительностью 1000 мкс. Для образца № 2 при мощности СВЧ-модуля 80 мВт, мощности лазерного излучения 450 мВт и длительности 50 мкс, с накоплением данных 30 измерений. Видно, что СВЧ-модуль с применением специальной конструкции СВЧ-резонатора позволяет уверенно фиксировать кривые нарастания и спада фотопроводимости методом отраженной СВЧ-мощности.

Из полученной временной зависимости фотопроводимости управляющая программа выделяет участок спада фотопроводимости в зависимости от выбранного стандарта обработки экспериментальных результатов. По международному стандарту SEMI MF 1535 [22] для вычисления эффективного ВЖ ННЗ выделяется нижняя часть кривой спада фотопроводимости от 45% до 5% от точки начала спада. По стандарту SEMI MF 28b [23] выделяется верхняя часть кривой спада фотопроводимости от точки начала спада и до точки, в которой значение фотопроводимости в  $e$  раз меньше. Затем экспериментальные точки на выбранном участке кривой аппроксимируются экспоненциальной зависимостью. Управляющая программа позволяет так же в ручном режиме выделять произвольный участок спада фотопроводимости для дальнейшей его аппроксимации.

Временную зависимость спада фотопроводимости при длительности импульса лазерного излучения, достаточной для достижения стационарной концентрации неравновесных носителей заряда в полупроводнике, можно аппроксимировать следующим образом [5]:

$$U = ce^{t/\tau_{eff}} + \text{const}, \quad (1)$$

где  $\tau_{eff}$  – эффективное ВЖ ННЗ;  $t$  – координата времени;  $U$  – величина спада фотопроводимости;  $c$  – калибровочный коэффициент;  $\text{const}$  – константа, определяемая уровнем отраженной СВЧ-мощности в отсутствие излучения лазерного диода. Данная константа зависит от УЭС полупроводника и не зависит от фотопроводимости.

Объемное ВЖ ННЗ связано с эффективным следующим соотношением [5]:

$$\frac{1}{\tau_v} = \left( \frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_s} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_v$  – объемное ВЖ ННЗ,  $\tau_s$  – время поверхностной рекомбинации. Причем вклад от поверхностной рекомбинации можно разделить на две составляющих: диффузию и собственно поверхностную рекомбинацию:

$$\tau_s = \tau_{diff} + \tau_{sr} = \frac{d^2}{\pi^2 D} + \frac{d}{2S}, \quad (3)$$

где  $d$  – толщина образца,  $\pi$  – константа,  $S$  – скорость поверхностной рекомбинации ННЗ,  $D$  – коэффициент диффузии ННЗ.

Для наших образцов с необработанной поверхностью скорость поверхностной рекомбинации превышает 10000 см/с. Поскольку толщина наших образцов монокристаллического и мульткристаллического кремния 6 мм и 3 мм соответственно, то вклад второго слагаемого формулы (3) пренебрежимо мал. Поэтому при обработке эксперименталь-

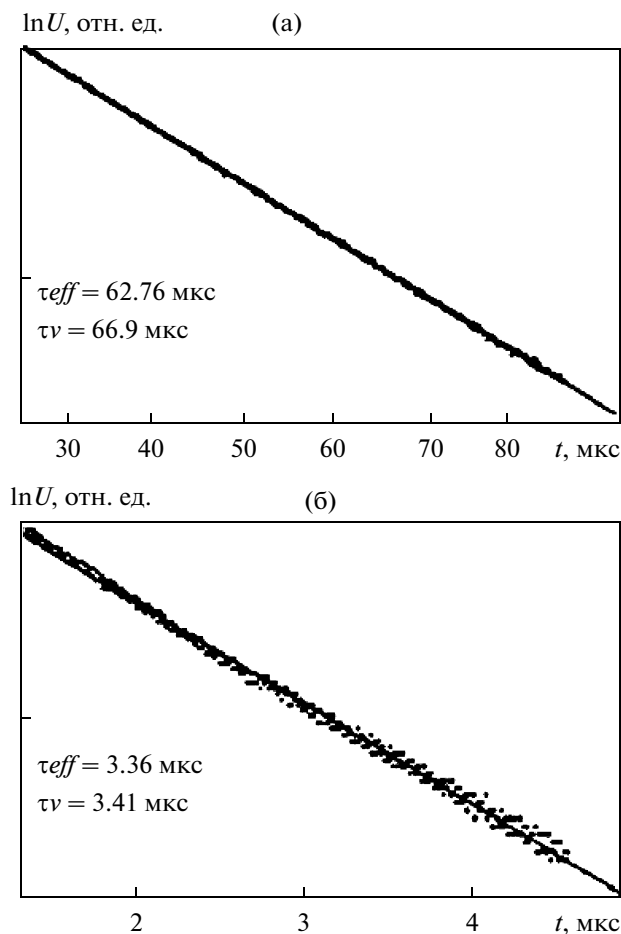


Рис. 5. Результаты измерения эффективного и расчета объемного ВЖ ННЗ для образцов № 1 – а; № 2 – б.

ных данных, расчет объемного ВЖ ННЗ проводился по формуле:

$$\tau_v = \left( \frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{\pi^2 D}{d^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где эффективное ВЖ ННЗ определяется из формулы (1).

На рис. 5 приведены результаты измерений эффективного и расчета по формуле (4) объемного ВЖ ННЗ для образцов № 1 и № 2, аппроксимированные по стандарту SEMI MF 28b, где  $t$  – время спада фотопроводимости,  $\ln U$  – логарифм амплитуды фотопроводимости. Отличие эффективного и объемного ВЖ ННЗ незначительно ввиду большой толщины образцов (6 мм для монокристаллического и 3 мм для мульткристаллического кремния).

На рис. 6 приведена измеренная временная зависимость фотопроводимости (а) и результаты измерений ВЖ ННЗ для монокристаллического кремния  $p$ -типа толщиной 7 мм с УЭС 1000 Ом см. Из рисунка видно, что СВЧ-модуль позволяет уве-

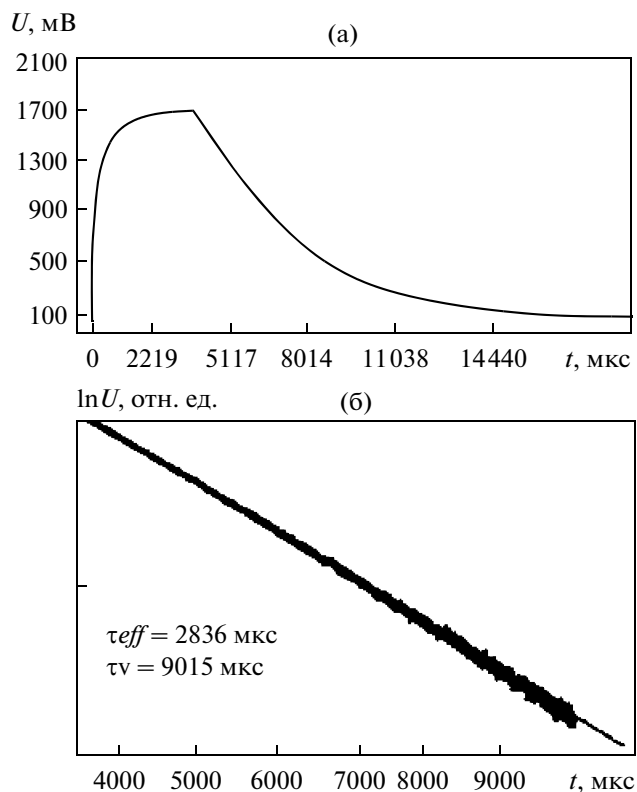


Рис. 6. Кривая нарастания и спада фотопроводимости (а) и результаты измерения эффективного и расчета объемного ВЖ ННЗ (б) для образца монокристаллического кремния с миллисекундным ВЖ ННЗ.

ренно фиксировать ВЖ ННЗ миллисекундного диапазона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструктивно СВЧ-модуль выполнен по микрополосковой технологии в пыле-влажозащищенном корпусе. Его габаритные размеры  $150 \times 80 \times 30 \text{ мм}$ . Максимальный диапазон перестройки частоты СВЧ-модуля составляет 4800–5300 МГц, минимальная дискретность 0.1 МГц. Диапазон регулировки мощности 0.01–100 мВт.

Разработанный СВЧ-модуль позволяет в автоматическом режиме проводить измерения ВЖ ННЗ на пластинах мульткристаллического и монокристаллического кремния в широком диапазоне их удельных сопротивлений. Измерения выполняются бесконтактным методом по отраженной СВЧ-мощности.

С помощью такого СВЧ-модуля измерение ВЖ ННЗ возможно проводить не только на частоте минимума отраженной СВЧ-мощности, но и на произвольной частоте данного частотного диапазона. Становится возможным измерение ВЖ ННЗ как на склоне резонансной кривой, так и по изменению ширины резонансной линии. Кроме того, осу-

ществляемый контроль формы резонансной линии позволяет устранять искажения резонансной линии во время измерений, повышая тем самым точность измерений ВЖ ННЗ.

На основе данного СВЧ-модуля и блока управления перемещением измерительного столика, применяемого в автоматизированном измерителе удельного электрического сопротивления пластин и слитков кремния [24] разработан прибор “Тауметр 2М”, предназначенный для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии бесконтактным СВЧ-методом.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы СО Российской АН “Импортозамещение”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ramsa A.P., Jacobs H., Brand F.M.* // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. № 7. P. 1054.
2. *Deb S., Nag B.R.* // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 4. P. 1604.
3. *Джекобс Н., Бренд Ф.А., Мейндл Дж.Д., Ветц С., Бенджамин Р., Холмс Д.А.* // ТИРИ. 1963. Т. 51. № 4. С. 608.
4. *Kunst M., Beck G.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. № 4. P. 1093.
5. *Павлов Л.П.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов // М.: Высшая школа, 1987. 239 с.
6. *Sanders A., Kunst M.* // Sol. St. Electron. 1991. V. 34. P. 1007.
7. *Swiatkowski C., Sanders A., Buhre K.-D., Kunst M.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 3. P. 1763.
8. *Schofthaler M., Brendel R.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. № 7. P. 3162.
9. *Schmidt J., Aberle A.G.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. № 9. P. 6186.
10. *Thomas A., Kennedy Jr., McCombe B.D.* Technique for contactless characterization of semiconducting material and device structures / Pat. No. 4087745 US. May 2, 1978.
11. *Tributsch H., Beck G., Kunst M.* Microwave measuring and apparatus for contactless non-destructive materials // Pat. No. 4704576 US. Nov. 3, 1987.
12. *Kawata Y., Kusaka T., Hashizume H., Futoshi M.* Apparatus for measuring the life time of minority carriers of a semiconductors wafer // Pat. No. 5438276 US. Aug. 1, 1995.
13. *Yoshida N., Takamatsu H., Sumie S., Kawata Y., Hashizume H., Ojima F.* Method of and apparatus for measuring lifetime of carriers in semiconductor sample // Pat. No. 5760597 US. Jun. 2, 1998.
14. *Данилов Г.Н., Медведев Ю.В., Петров А.С.* Устройство для измерения удельного сопротивления высокоомных полупроводниковых материалов и времени жизни свободных носителей тока // Патент СССР № 347691. Оpubл. 10.08.1972.
15. *Наливайко Б.А.* Устройство для измерения удельного сопротивления высокоомных полупроводниковых материалов и времени жизни свободных носителей тока // Патент СССР № 496515. Оpubл. 25.01.1975.
16. *Ахманаев В.В., Данилов Г.Н., Медведев Ю.В., Петров А.С.* Датчик электрофизических параметров полупроводниковых материалов // Патент РФ № 1212156. Оpubл. 15.06.1994.
17. *Горюнов Н.Н., Кобелева С.П., Чарыков Н.А., Лукашев Н.В., Слесарев В.Н.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70 № 5. С. 27.
18. *Boda J., Ferenczi G., Horvath P., Mirk Z., Pavelka T.* Method and apparatus for measuring minority carrier lifetime in semiconductor materials // Pat. No. 5406214 US. Apr. 11, 1995.
19. *Владимиров В.М., Коннов В.Г., Марков В.В., Мартыновский В.Н., Репин Н.С., Шепов В.Н.* СВЧ-модуль для бесконтактного измерения параметров полупроводников // Труды 20<sup>ой</sup> Международной Крымской конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. 2010. С. 967.
20. *Бородовский П.А., Булдыгин А.Ф., Токарев А.С.* // ФТП. 2004. Т. 38. № 9. С. 1043.
21. *Владимиров В.М., Марков В.В., Мартыновский В.Н., Шепов В.Н.* Устройство для измерения электрофизических параметров полупроводников бесконтактным СВЧ-методом / Патент на изобретение по заявке № 2010104582/07 от 03.02.2010.
22. SEMI MF1535. Test methods for carrier recombination lifetime in silicon wafers by noncontact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance.
23. SEMI MF28(b). Standard test methods for minority-carrier lifetime in bulk germanium and silicon by non-contact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance.
24. *Владимиров В.М., Гринин Э.Ф., Сергей М.Е., Шепов В.Н.* // Измерительная техника. 2010. № 5. С. 51.