

УДК 621.317.799

В.М. ВЛАДИМИРОВ, В.В. МАРКОВ, В.Н. ШЕПОВ

## МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ БЕСКОНТАКТНЫМ СВЧ-МЕТОДОМ

Разработан микрополосковый СВЧ-датчик, предназначенный для измерения параметров полупроводников бесконтактным СВЧ-методом. Проведено сравнение результатов измерений времени жизни неосновных носителей заряда в монокристаллическом и мультикристаллическом кремнии с применением данного датчика и ранее известной конструкции микрополоскового датчика. Показано преимущество разработанного датчика при измерении времени жизни неосновных носителей заряда в образцах кремния с низким удельным сопротивлением.

*Ключевые слова:* микрополосковый датчик, кремний, бесконтактный СВЧ-метод.

### Введение

Как известно, бесконтактный СВЧ-метод контроля параметров полупроводников является неразрушающим и применяется для измерения объемного времени жизни неосновных носителей заряда (ВЖ ННЗ) в полупроводниках [1]. Данный метод является одним из основных и рекомендован международным стандартом [2]. Согласно данному стандарту, генерация избыточных носителей заряда в полупроводнике осуществляется световыми импульсами, а измерение ВЖ ННЗ проводится по участку спада фотопроводимости методом отраженной от полупроводника СВЧ-мощности.

Одним из важнейших функциональных узлов бесконтактного СВЧ-измерителя ВЖ ННЗ является СВЧ-датчик, обеспечивающий связь между изменением фотопроводимости полупроводника и уровнем отраженной от него СВЧ-мощности.

В настоящей работе обсуждается применение ранее известного микрополоскового СВЧ-датчика [3] и предложенного нами в [4] для измерений времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии бесконтактным СВЧ-методом.

### Конструкции микрополосковых датчиков и методика эксперимента

Размеры микрополосковых резонаторов (МПР) для датчиков, предложенных в [3, 4], предварительно рассчитывались таким образом, чтобы резонансные частоты МПР были приблизительно равны и попадали в середину частотного диапазона СВЧ-модуля, применяемого для измерения ВЖ ННЗ в полупроводниках [5]. Данный модуль спроектирован по принципу цифровой фазовой автоподстройки частоты генератора, управляемого напряжением. Диапазон автоматической перестройки частоты СВЧ-модуля составляет 4800–5300 МГц, минимальная дискретность 0,1 МГц, диапазон регулировки СВЧ-мощности 0,01–100 мВт. Модуль позволяет автоматически контролировать не только изменение частоты и амплитуды резонансной линии, но и изменение добротности микрополоскового датчика при нагружении его на образцы полупроводника.

Оба МПР для датчиков были изготовлены на подложке с диэлектрической проницаемостью 3,3 и толщиной 0,508 мм. Ширина полоскового проводника обоих МПР была равна 0,5 мм. С обратной стороны подложки обоих МПР в экране была вырезана контактная площадка для емкостной связи МПР с линией передачи.

Микрополосковый СВЧ-датчик, предложенный в [3], представлял собой МПР кольцевого типа, с отверстием для лазерного излучения, выполненным внутри кольцевого проводника. Топология полоскового проводника МПР, предложенного в [4], показана на рис. 1, а.

Противоположные концы полоскового проводника датчика [4] сведены вместе через зазор  $S$ . Ширина проводника  $W1$  может выполняться как одинаковой по всей длине СВЧ-резонатора, так и отличной от ширины  $W2$  на участке проводника длиной  $L2$ . Данное скачкообразное изменение ширины полоскового проводника позволяет регулировать резонансную частоту основной моды

колебаний, которая используется для измерения ВЖ ННЗ, а также регулирует величину емкости между концевым участком полоскового проводника и заземленным основанием.

Между концами полоскового проводника МПР выполнено сквозное отверстие, через которое проходит излучение лазерного диода, закрепленного с другой стороны диэлектрической подложки МПР. Данная область рис. 1, а показана штриховой линией.

Конструктивно эта часть устройства была выполнена таким образом, что измеряемый полупроводник воздействовал не на весь МПР целиком, а только на область резонатора А, обозначенную на рис. 1, а и штриховой линией. Остальная часть резонатора располагалась на боковой поверхности зонда и соединялась с частью А перемычками. Один из вариантов конструкции такого микрополоскового датчика показан на рис. 1, б.

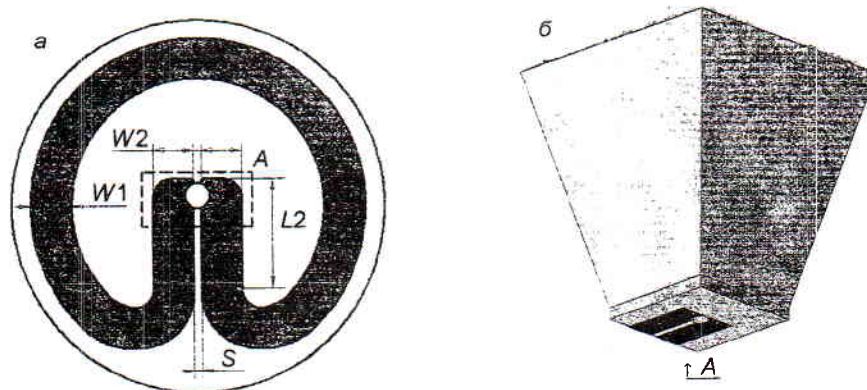


Рис. 1. Топология полоскового проводника (а) и пример конструкции (б) микрополоскового датчика

Оба микрополосковых датчика поочередно подключались к СВЧ-модулю. С обратной стороны обоих МПР был идентично закреплен полупроводниковый лазерный диод. Длина волны излучения лазерного диода 1,06 мкм, предельная мощность непрерывного излучения 500 мВт. Мощность СВЧ-генератора, мощность и длительность излучения лазерного диода, связь МПР с линией передачи, диаметр отверстия в МПР, сквозь которое проходит излучение лазерного диода, зазор между резонатором и измеряемыми полупроводниками в обоих случаях были одинаковы.

### Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены временные зависимости нарастания и спада фотопроводимости для образца монокристаллического кремния с удельным электросопротивлением (УЭС) 10 Ом·см, измеренные на датчиках [3, 4] (кривые 1 и 2 соответственно). Данные получены при мощности СВЧ-излучения 50 мВт, мощности излучения лазерного диода 100 мВт, длительности одиночного импульса лазерного излучения 1 мс, зазоре между СВЧ-датчиком и образцом кремния 300 мкм. Из рисунка видно, что амплитуда СВЧ-сигнала на датчиках приблизительно одинакова в обоих случаях.

На рис. 3 приведены зависимости логарифма спада фотопроводимости от времени для данного образца монокристаллического кремния. Из рис. 3 видно, что в обоих случаях зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией. Значения объемного ВЖ ННЗ, вычисленные по участку спада фотопроводимости согласно международному стандарту SEMI MF1535, равны 129 и 126 мкс соответственно, что говорит о довольно хорошем совпадении результатов измерений ВЖ ННЗ кремния с помощью данных СВЧ-датчиков. Среднеквадратичное отклонение составило  $4,7 \cdot 10^{-5}$  и  $3,6 \cdot 10^{-5}$  соответственно.

На рис. 4 приведены временные зависимости нарастания и спада фотопроводимости для образца мульткристаллического кремния с УЭС 0,5 Ом·см, измеренные на датчиках [3, 4] (кривые 1 и 2 соответственно). Данные получены при мощности СВЧ-излучения 80 мВт, мощности излучения лазерного диода 400 мВт, длительности импульса лазерного излучения 1 мс, зазоре между СВЧ-датчиком и образцом кремния 50 мкм с накоплением данных 10 измерений.



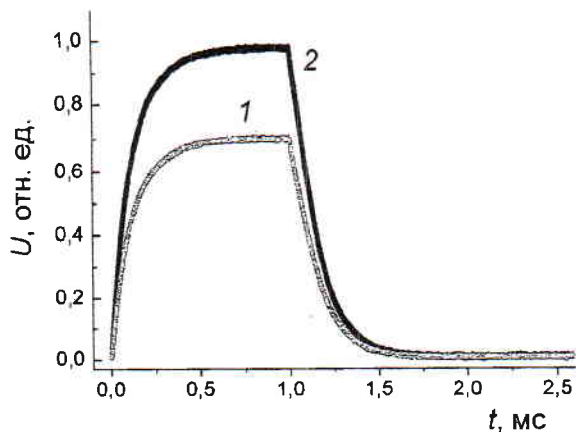


Рис. 2. Временная зависимость фотопроводимости

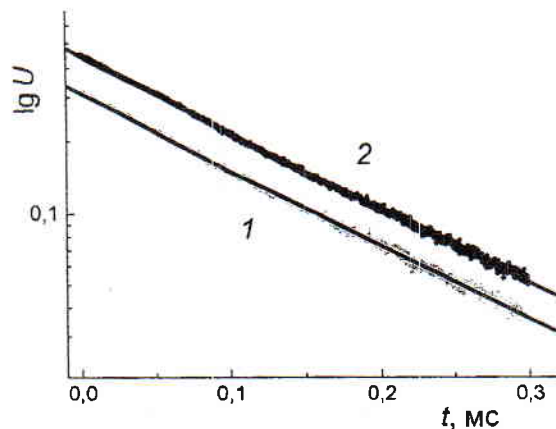


Рис. 3. Зависимости логарифма спада фотопроводимости от времени

Из рис. 4 видно, что изменение амплитуды СВЧ-сигнала на датчике [3] значительно меньше, чем на датчике [4]. Низкая чувствительность датчика [3] обусловлена тем, что полосковый проводник СВЧ-резонатора этого датчика выполнен в виде замкнутого кольца. В такой конструкции МПР силовые линии высокочастотного электрического поля сосредоточены, в основном, между проводящим полосковым проводником, выполненным в виде кольца, и заземленным основанием. Измеряемый же образец полупроводника находится над кольцевым проводником МПР, что снижает чувствительность СВЧ-резонатора и приводит к потере точности измерений такого датчика. Кроме того, отверстие для лазерного излучения в такой конструкции датчика выполнено не в самой пучности высокочастотного электрического поля, а вблизи него, что также приводит к потере чувствительности такого микрополоскового датчика.

Чувствительность же СВЧ-датчика [4] значительно выше приведенного в [3]. Это происходит потому, что в МПР датчика [4] 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.

На рис. 5 приведены зависимости логарифма спада фотопроводимости от времени для образца мультикристаллического кремния с УЭС  $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , полученные из рис. 4. Из рис. 5 видно, что снижение чувствительности датчика [3] приводит к увеличению погрешности аппроксимации спада фотопроводимости даже при включении режима накопления данных. При этом среднеквадратичное отклонение возросло с  $2 \cdot 10^{-4}$  (кривая 2) до  $8 \cdot 10^{-4}$  (кривая 1).

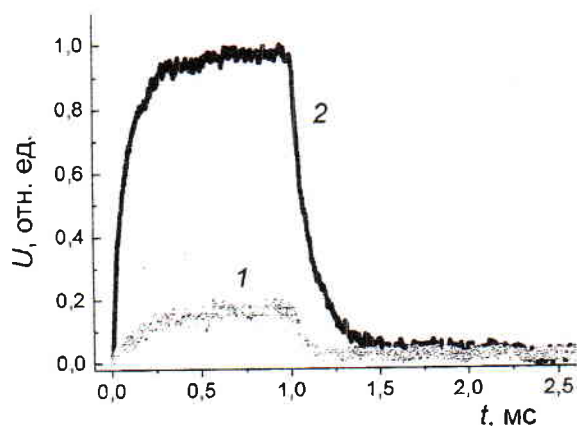


Рис. 4. Временная зависимость фотопроводимости

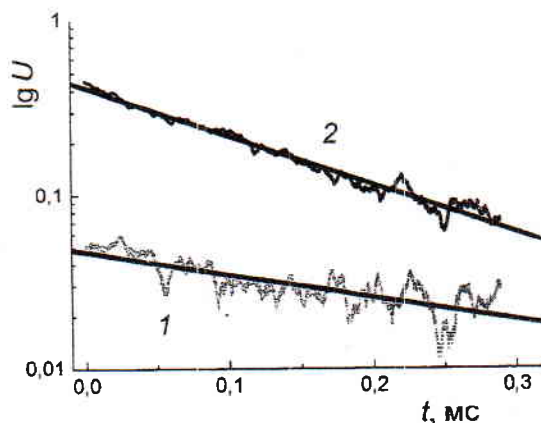


Рис. 5. Зависимости логарифма спада фотопроводимости от времени

### Заключение

Таким образом, измерения ВЖ ННЗ в кремнии с помощью предложенного в [4] микрополоскового СВЧ-датчика показали, что при измерении ВЖ ННЗ на образцах монокристаллического кремния с УЭС свыше 10 Ом·см полученные результаты практически не отличаются от данных полученных с применением микрополоскового СВЧ-датчика, конструкция которого предложен ранее в [3].

Однако при измерениях ВЖ ННЗ на образцах мульткристаллического кремния с УЭС мене 0,5 Ом·см, изменение амплитуды СВЧ-сигнала на датчике, предложенном в [4], значительно выше что приводит к повышению точности измерений ВЖ ННЗ. Измерения ВЖ ННЗ на низкоомно кремнии необходимы при отработке технологии получения мульткристаллического кремния для солнечной энергетики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramsa A.P., Jacobs H., and Brand F.M. // J. Appl. Phys. – 1959. – V. 30. – No. 7. – P. 1054.
2. SEMI MF1535. Test methods for carrier recombination lifetime in silicon wafers by noncontact measurement photoconductivity decay by microwave reflectance.
3. Voda J., Ferenczi G., Horvath P., et al. Method and apparatus for measuring minority carrier lifetime in semiconductor materials // Pat. No. 5406214 US. Apr. 11, 1995.
4. Владимиров В.М., Марков В.В., Мартыновский В.Н., Шепов В.Н. Устройство для измерения электрофизических параметров полупроводников бесконтактным СВЧ-методом // Патент России изобретение № 2430383. Оpubл. 27.09.2011. Бюл. № 27.
5. Владимиров В.М., Коннов В.Г., Марков В.В. и др. // Микроэлектроника. – 2011. – Т. 40 № 4. – С. 313–318.

Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Россия  
E-mail: shepov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.06.