DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

УДК 621.315.592

БЕСКОНТАКТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ

А.Б.ФЕДОРЦОВ, А.С.ИВАНОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Предложены бесконтактные неразрушающие лазерно-интерферометрические методы измерения целого ряда электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических слоев. Это время жизни носителей заряда, причем раздельно электронов и дырок; параметры центров рекомбинации, а именно их концентрация и сечения захвата; объемное время жизни и скорость поверхностной рекомбинации, а также диффузионная длина носителей заряда. Методы основаны на интерференционно-абсорбционном взаимодействии в полупроводнике двух различающихся по длине волны лазерных излучений. Коротковолновое инжектирующее излучение генерирует в материале дополнительные носители заряда, что приводит к изменению его оптических констант на длине волны другого – длинноволнового зондирующего лазерного излучения – и к модуляции этого излучения при прохождении им исследуемого образца материала. Разработаны средства реализации предложенных методов и способы обработки модуляционного сигнала для определения параметров исследуемых образцов.

Методы успешно апробированы на образцах таких материалов, как германий, кремний, антимонид индия и сплав кадмий – ртуть – теллур. Показано, что методы могут быть использованы как при проведении научных исследований, так и в электронной промышленности.

***Ключевые слова*:** лазерная интерферометрия, бесконтактный контроль, электрофизические параметры

Как цитировать эту статью: Федорцов А.Б. Бесконтактный лазерный контроль электрофизических параметров полупроводниковых слоев / А.Б.Федорцов, А.С.Иванов // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 299-306. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

Введение. Металлургия полупроводников является особенным направлением в металлургии [12]. Это связано с тем, что использование полупроводников в электронной промышленности требует высокой чистоты материала. Она должна отвечать правилу «девяти девяток»: основное вещество должно составлять не менее 0,999999999 всей массы. В противном случае уровни, создаваемые атомами примеси в запрещенной зоне полупроводника, недопустимо изменяют его электрофизические свойства. Кроме того, большинство полупроводников производятся металлургическими заводами в виде монокристаллов с заданным кристаллографическим направлением. После изготовления кристаллы, которые могут иметь весьма внушительные размеры, разделяются на пластины толщиной 0,5 мм. Обычно эти пластины шлифуются и полируются и уже в таком виде поставляются с металлургических заводов в электронную промышленность, где в результате целого ряда технологических операций на пластинах формируются электронные приборы различного назначения. Высокая чувствительность полупроводников практически ко всем воздействиям требует контроля их электрофизических свойств на всех стадиях производства как в металлургической, так и в электронной промышленности [1, 11]. Причем желательно, чтобы этот контроль был неразрушающим, бесконтактным и локальным.

Большинство известных средств измерения параметров полупроводниковых материалов являются контактными, т.е. требуют создания электрического контакта с исследуемым полупроводником [2, 5, 13, 31]. Это всегда или неудобно, или вообще невозможно. В том случае, если на одной полупроводниковой пластине размещается большое число приборов, (например, при использовании планарной технологии), часть пластины приходится отводить для изготовления специально разрабатываемых тестовых структур. Технология этих структур должна быть совместима с технологией производства основных приборов и не должна изменять параметров полупроводника при своем изготовлении.

Создание тестовых структур ведет к непроизводительному расходу рабочей площади полупроводниковой пластины и, как следствие, к уменьшению выхода рабочих приборов с одной пластины и к увеличению их стоимости. Кроме того, при использовании тестовых структур измерения проводятся не в рабочей зоне прибора, а рядом, где параметры полупроводника могут отличаться. Сам процесс измерения тестовых структур при установлении электрического контакта с ними механическим способом может привести к отказу основных приборов из-за повреждений и загрязнения полупроводниковой пластины.

Именно поэтому усилия разработчиков направлены на создание методов измерения параметров полупроводниковых материалов, не требующих механического контакта. Например, разработаны методы измерения, в которых для установления зондирования тестовой структуры в измерительной установке используется электронный луч [21, 31]. Растровые, сканирующие методы элек-

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

тронно-лучевого зондирования позволяют получать исключительно высокое разрешение по площади исследуемого образца, детально исследовать его поверхность. Однако использование электронного луча требует вакуумирования измеряемого образца при проведении измерений. Это значительно увеличивает время измерений и их стоимость. Вследствие этого электронно-лучевые методы находят применение прежде всего при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области полупроводникового приборостроения.

В последние годы существенное развитие получили методы, в которых для зондирования электрофизических параметров полупроводников используется электромагнитное излучение сверхвысоких частот [8, 15, 17, 24]. К сожалению, все работы, в которых применяется электромагнитное излучение сверхвысоких частот, имеют существенный недостаток – невысокую разрешающую способность по площади. Как известно, разрешающая способность определяется длиной волны используемого излучения, которое в данном случае превышает 1 мм. Разрешающая способность сверхвысокочастотных методов составляет миллиметры, что во многих случаях недостаточно, особенно в производстве микроразмерных приборов.

Оптические методы контроля. Использование для зондирования полупроводников излучения оптического диапазона (инфракрасного и видимого) теоретически позволяет в десятки раз повысить разрешающую способность бесконтактных методов лучевого зондирования. В частности, излучение современных лазеров может быть сфокусировано в пятно размером в несколько микрон. Вопрос заключается в том, как именно применять лазерное излучение для исследования электрофизических свойств полупроводников.

Такие оптические характеристики полупроводника, как показатели поглощения и преломления им оптического излучения, в соответствии с электронной теорией дисперсии зависят [10] от концентрации в нем носителей заряда (электронов и дырок). Эта зависимость более сильная при больших длинах волн, т.е. в инфракрасном оптическом диапазоне. В этом же диапазоне полупроводники обычно имеют области прозрачности или слабого поглощения. Лазерное излучение с длиной волны, соответствующей этим окнам прозрачности, может выступать в качестве зондирующего.

Увеличения концентрации в полупроводнике носителей заряда, электронов и дырок, можно добиться путем генерации в нем неравновесных электронно-дырочных пар. Сделать это можно также с помощью оптических излучений, но из области других длин волн, соответствующих внутреннему фотоэффекту в исследуемом полупроводнике.

Во всяком случае теоретически использование оптического излучения позволяет построить полностью бесконтактные методы исследования поведения электрических зарядов в полупроводниковых материалах.

Возникновение в полупроводнике дополнительных электронно-дырочных пар при его освещении излучением из спектральной области внутреннего фотоэффекта полупроводника увеличивает показатель поглощения в нем длинноволнового зондирующего луча инфракрасного излучения. Это приводит к изменению пропускания зондирующего луча исследуемым образцом. По величине возникающей модуляции зондирующего луча можно судить об электрофизических свойствах полупроводника. К сожалению, метод, основанный на измерении модуляции поглощения, является недостаточно чувствительным [27, 29, 30]. Для его применения в исследуемых образцах необходимо достичь концентрации дополнительных носителей заряда более чем 10^{16}-10^{17}см$^{-3}$.

Вместе с тем в последние годы интенсивно разрабатывались обладающие высокой чувствительностью бесконтактные лазерные методы измерения толщины полупроводниковых и диэлектрических слоев, основанные не только на поглощении, но и на интерференции зондирующего оптического излучения. Основной целью разработанных методов было определение геометрической толщины полупроводниковых и диэлектрических слоев. При этом были достигнуты высокая чувствительность и быстродействие [18, 26, 28]. На самом деле в этих методах определяется не геометрическая толщина слоя, а его оптическая толщина, которая является произведением геометрической толщины на показатель преломления материала. Обычно в оптических исследованиях полупроводниковых материалов интерференцией лазерного излучения в полупроводнике или пренебрегали, или ее подавляли, лишь в небольшом числе работ учитывались интерференционные эффекты. Как оказалось, учет и использование этих более тонких, но надежно регистрируемых эффектов позволяет создать новые методы исследования и получить более детальные сведения о рекомбинационных характеристиках полупроводников.

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

Физический принцип лазерно-интерференционного определения электрофизических параметров полупроводников. Идея, предложенная авторами, заключалась в том, чтобы хорошо разработанные для исследования геометрических параметров полупроводниковых и диэлектрических слоев интерференционные лазерные методы модифицировать так, чтобы они позволили исследовать кинетику процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в полупроводниках и определяющие эти процессы электрофизические параметры. Для этого был предложен новый физический механизм – механизм интерференционно-абсорбционного взаимодействия в полупроводнике двух лазерных излучений [7]. Он заключается в следующем. Одно из излучений имеет энергию фотонов больше ширины запрещенной зоны исследуемого полупроводника. Оно поглощается в полупроводнике и генерирует в нем электронно-дырочные пары, изменяя концентрации свободных носителей заряда. Другое излучение соответствует области прозрачности полупроводника. Оно является зондирующим, имеет энергию фотонов меньше ширины запрещенной зоны полупроводника и, соответственно, поглощается в нем очень слабо. Исследуемый образец выполняется в виде плоскопараллельной пластинки и заключается между двумя отражающими поверхностями, образующими интерферометр Фабри – Перо. В качестве таких отражающих поверхностей, могут служить грани самого образца (за счет скачка показателя преломления на границе воздух – полупроводник). Параметры зондирующего излучения, как прошедшего через образец, так и отраженного, прежде всего его интенсивность, определяются результатом интерференции. Генерация в полупроводнике неравновесных носителей тока при его освещении лазером-инжектором приводит к изменению показателя преломления и коэффициента поглощения полупроводника на длине волны зондирующего лазерного луча. Это, в свою очередь, вызывает изменение интенсивности прошедшего через образец зондирующего луча (и отраженного им) вследствие перестройки полупроводникового интерферометра по длине волны и возрастания поглощения в нем.

Математические закономерности лазерно-интерференционной модуляции. Сделанные расчеты показали, что изменение мощности зондирующего луча может превосходить значение мощности вызывающего этот эффект излучения инжектирующего лазера. Таким образом, возможна реализация оптического усиления в системе лазер – полупроводник [7]. Опыты по обнаружению и исследованию эффекта интерференционной модуляции были выполнены на германии [16]. В ходе проведенных экспериментов была подтверждена правомерность предложенной модели явления и установлена взаимосвязь между величиной интерференционной модуляции и концентрацией неравновесных носителей тока. Были получены формулы, связывающие величину модуляции зондирующего луча как с концентрацией неравновесных носителей и их временем жизни, так и с интерференционными характеристиками образцов – производными его пропускания по фазовому углу зондирующего излучения и величине поглощения за один проход [23]. Коэффициент модуляции зондирующего излучения $M = \Delta I/I$ зависит от времен жизни неравновесных носителей заряда следующим образом:

$$M = \left[T_v'\left(\sigma_p\tau_p + \sigma_n\tau_n\right) + T_\delta' \frac{e^2\lambda_z}{2\pi\varepsilon_0 nc^2}\left(\frac{\tau_p}{m_p^*} + \frac{\tau_n}{m_n^*}\right)\right]\beta L ,$$

где σ_n и σ_p – сечения поглощения зондирующего излучения электронами и дырками; m_n^* и m_p^* – эффективные массы электронов и дырок; T_δ' и T_v' – производные пропускания образца по фазовому углу $\delta = (4\pi nl\cdot\cos\varphi_2)/\lambda_z$ и параметру $v = \exp(-\alpha_z l)$; l – толщина образца; n – показатель преломления «неосвещенного» полупроводника; φ_2 – угол преломления зондирующего излучения в полупроводнике; e – заряд электрона; ε_0 – электрическая постоянная; c – скорость света в вакууме; β – квантовый выход внутреннего фотоэффекта; L – количество квантов излучения инжектора, поглощенных в образце. Как видим, в эту формулу входят мировые константы и параметры полупроводника σ_n, σ_p, n, m_n^*, m_p^*.

Значения T_δ' и T_v' можно получить, продифференцировав функцию Эйри. В частности, при $v \approx 0$ (что и имеет место при выборе λ_z из области высокой прозрачности полупроводника) T_δ' и T_v' определяются выражениями

$$T_v' = \frac{(1-R)^2(1-R^2)}{[(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)]^2} ,$$

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

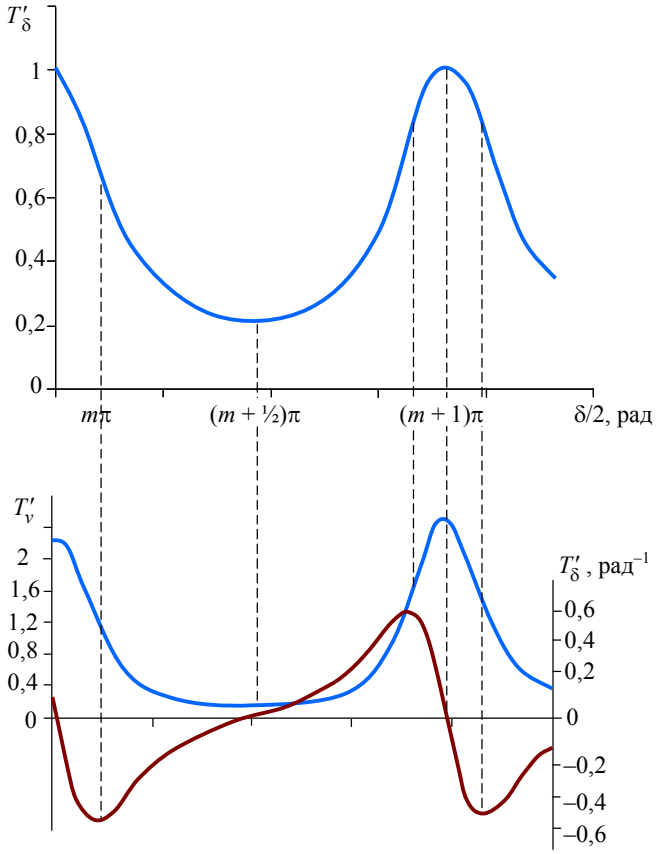


Рис.1. Зависимости T_δ' и T_v' от фазового угла δ для идеального интерферометра Фабри-Перо

$$T'_\delta = \frac{-2(1-R)^2 R\sin\delta}{[(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)]^2},$$

где R – коэффициент отражения грани образца.

Графически эти функции изображены на рис.1.

Экспериментальные схемы. Раздельное определение времен жизни электронов и дырок. Анализ установленных физических закономерностей механизма интерференционной модуляции позволил предложить в одном опыте способ раздельного определения концентраций и времен жизни неравновесных электронов и неравновесных дырок [14]. Основным рекомбинационным параметром полупроводника является время жизни в нем носителей заряда: электронов и дырок. Время жизни носителей, т.е. время от генерации (например, светом) пары электрон – дырка до их взаимного уничтожения – рекомбинации – может быть для электронов и дырок как одинаковым, так и различным. Различие возникает обычно в том случае, когда рекомбинация идет не напрямую, а через центры рекомбинации, в качестве которых выступают примеси и дефекты. Сечения захвата на такие центры, особенно заряженные, могут сильно различаться для электронов и дырок. Поэтому вначале захватывается и теряет подвижность носитель одного знака, а через некоторое время – другого. Концентрации центров рекомбинации и сечения захвата на них носителей также являются важными рекомбинационными параметрами полупроводника.

Предложенный метод основан на различном характере двух составляющих зависимости модуляции пропускания зондирующего луча образцом от увеличения в нем концентрации носителей. Составляющая, связанная с поглощением, с ростом концентрации всегда растет. Составляющая, связанная с изменением показателя преломления, при росте концентрации носителей может как расти, так и уменьшаться. Это является следствием периодичности пропускания в зависимости от оптической толщины образца, а значит, и показателя преломления. Таким образом, если провести измерения модуляции зондирующего луча, возникающей в образце при его освещении оптическим инжектором, при двух различных значениях оптической толщины образца (рис.2), получим систему двух линейных уравнений неравновесных концентраций электронов и дырок, которая легко разрешается.

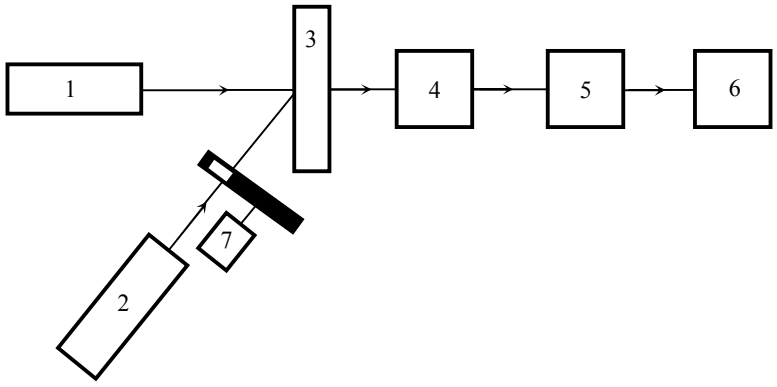


Рис.2. Схема экспериментальной установки для раздельного определения времен жизни неравновесных электронов и дырок

1 – источник зондирующего излучения; 2 – источник инжектирующего излучения; 3 – исследуемый образец; 4 – фотоприемник; 5 – селективный усилитель У2-8; 6 – синхронный детектор В9-2; 7 – модулятор инжектирующего излучения

Аналогично можно получить систему двух уравнений времени жизни электронов и дырок, из которой раздельно определяются две эти величины. Изменять оптическую толщину образца можно разными

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

способами: его поворотом, нагревом, помещением во внешний интерферометр. Нами использовался поворот образца относительно оси, перпендикулярной зондирующему лучу.

Отметим, что лазерная интерферометрия позволяет в одном эксперименте не только раздельно определить неравновесные концентрации электронов и дырок и их время жизни, но и сделать это бесконтактно и локально. Впервые экспериментально раздельное определение времен жизни электронов и дырок было выполнено нами на образцах германия, легированного сурьмой и компенсированного примесью меди.

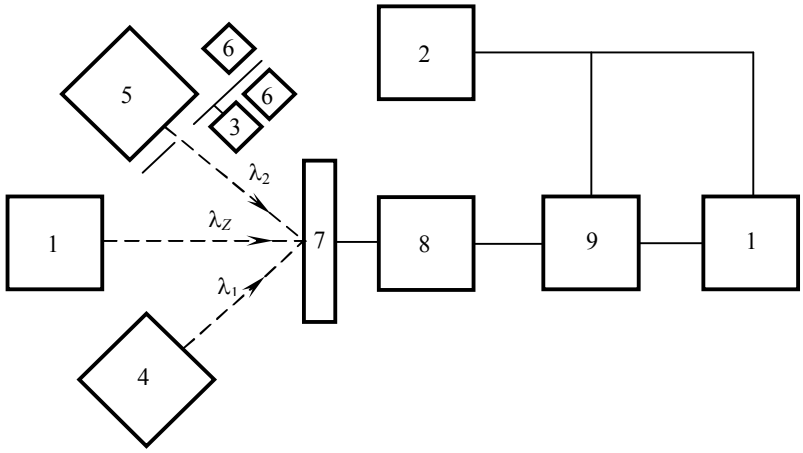


Рис.3. Схема экспериментальной установки для измерения объемного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации в кремниевых образцах

1 – лазер-зонт ЛГ-74; 2 – осциллограф; 3 – обтюратор; 4 – оптический инжектор на основе светодиодов АЛ-119А; 5 – оптический лазер-инжектор ЛГ-126; 6 – оптронная пара; 7 – исследуемый образец; 8 – фотоэлектрический приемник; 9 – селективный усилитель; 10 – синхронный детектор

Определение объемного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации. Обычно поверхность образца более богата дефектами, чем его объем. Поэтому время жизни в реальном образце зависит от двух величин: скорости рекомбинации на поверхности и объемного времени жизни, являющегося объективной характеристикой материала. Нами был предложен метод бесконтактного лазерно-интерферометрического определения объемного времени жизни носителей, которое является объективной характеристикой материала (в отличие от их времени жизни в конкретном образце), а также определения скорости поверхностной рекомбинации носителей [6, 19]. Для проведения таких исследований необходимо наличие оптического инжектора с несколькими длинами волн, на которых глубины областей генерации носителей достаточно различаются.

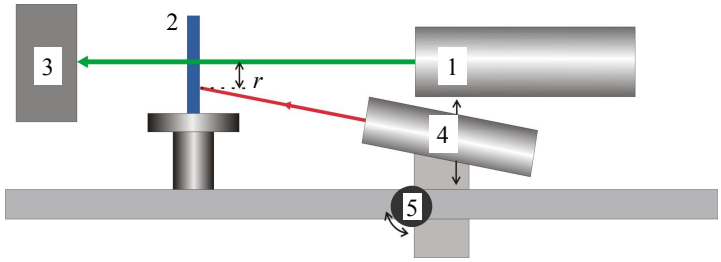


Рис.4. Схема экспериментальной установки для контроля длины диффузии носителей заряда

1 – источник длинноволнового зондирующего излучения; 2 – исследуемый образец; 3 – фотоэлектрический приемник; 4 – источник коротковолнового инжектирующего излучения; 5 – микрометрическая подвижка

Проведенные опыты (рис.3) и расчеты показали, что измерения интерференционной модуляции зондирующего луча, проведенные при двух различных длинах волн инжектора (из которых, например, одна соответствует поверхностному, а другая преимущественно объемному поглощению), позволяют получить два уравнения, из решения которых определяются объемное время жизни и скорость поверхностной рекомбинации.

Измерение длины диффузии носителей заряда. Для измерения такого важного параметра неметаллических слоев как длина диффузии носителей заряда потребовалось усложнить схему измерительной установки [9]. Необходимо было обеспечить возможность рассовмещения лучей инжектирующего и зондирующего лазеров по поверхности исследуемого образца на контролируемое расстояние r (рис.4). Предложенный лазерно-интерферометрический метод измерения длины диффузии носителей заряда является бесконтактным аналогом метода подвижного светового зонда с точечным регистрирующим контактом. Данные о диффузионной длине получаются из опытной зависимости локальной концентрации избыточных носителей заряда от расстояния r между точкой ее измерения и точкой генерации носителей коротковолновым лазером 4. Это расстояние регулируется с помощью микрометрической подвижки 5. Инжектирующее излучение лазера 4 генерирует в образце 2 допол-

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

нительные носители заряда, что приводит к изменению оптических констант материала образца и модуляции прошедшего через него длинноволнового зондирующего излучения, которое генерируется лазером 1. Это излучение фотоэлектрическим приемником 3 преобразуется в электрический сигнал. Регистрируемый сигнал уменьшается при росте расстояния *r* между точками генерации носителей и измерения их концентрации. Длина диффузии устанавливается сравнением полученной экспериментальной зависимости с аналогичными зависимостями, рассчитанными теоретически [30].

Определение параметров центров рекомбинации. Если определять времена жизни, как электронов, так и дырок, в широком интервале температур, то в ряде случаев возможно рассчитать такие параметры центров рекомбинации электронов и дырок, как сечения захвата на эти центры электронов и дырок, а также концентрацию этих центров. Такие исследования становятся более сложными из-за необходимости помещения образца в охлаждаемый жидким азотом оптический криостат с окнами, прозрачными в средней инфракрасной области (на длине волны 10,6 мкм). Подобные измерения были выполнены на образцах сплава кадмий – ртуть – теллур, являющегося материалом для создания приемников инфракрасного излучения [19].

Методы обработки информационного сигнала. Нами были предложены и запатентованы различные методы и оптико-электронные схемы обработки информационного сигнала при лазерной интерферометрии полупроводников и дан их сравнительный анализ. В частности, фазовый метод имеет преимущество, когда времена жизни электронов и дырок равны. Метод основан на измерении разности фаз оптического инжектора и приемника зондирующего излучения. Эта разность фаз возникает вследствие отставания колебаний неравновесной концентрации носителей от колебаний интенсивности генерирующего их излучения и несет информацию о времени жизни носителей тока.

Амплитудный метод основан на измерении амплитуды переменной составляющей прошедшего через образец (или отраженного им) зондирующего излучения, возникающей при одновременном освещении образца светом оптического инжектора, модулированного с фиксированной частотой. Рационально его использовать, когда времена жизни электронов и дырок различаются, и, когда такие параметры полупроводника, как его показатель преломления и эффективные массы электронов и дырок, известны.

Частотный вариант лазерной интерферометрии основан на измерении амплитуды зондирующего излучения после его взаимодействия с исследуемым образцом в зависимости от частоты инжектирующего излучения.

Требования к исследуемым образцам. Обычно представления об интерференционных измерениях связаны с высокими требованиями к оптическому качеству исследуемых образцов. Реальные полупроводниковые образцы не являются идеальным интерферометром Фабри – Перо из-за недостаточной параллельности граней (клиновидности образца) и их шероховатости. Специальная механическая подготовка образцов для исследований меняет их свойства, в том числе электрофизические. Нами теоретически была исследована и экспериментально доказана возможность изучения таких неидеальных образцов. Длина волны зондирующего лазера может и должна быть достаточно большой. Обычно это 10,6 мкм (лазер на углекислом газе), или 3,39 мкм (гелий-неоновый лазер). При таких значениях длины волн и параметры несовершенств образца могут иметь сравнимую величину. Оказалось, что критерием пригодности образцов для интерференционных измерений является их контрастность, т.е. отношение максимального и минимального значений интерференционной зависимости пропускания зондирующего луча. Ее значение должно составлять не менее 1,2. Это соответствует возможной неоднородности образца по толщине в 1,3 мкм на ширине зондирующего луча, что не является жестким требованием. Ему практически всегда удовлетворяют полупроводниковые пластины (даже шлифованные), используемые в производстве микро- и наноэлектронных приборов, и они не требуют специальной подготовки для измерений. Контрастность определяется достаточно просто путем измерения интерференционной кривой, наблюдающейся при повороте образца вокруг оси, перпендикулярной зондирующему лучу.

Серийные измерения можно проводить и на шлифованных образцах, причем их интерференционное качество даже выше, чем у полированных, вследствие лучшей плоскостности.

Экспериментальные результаты. Впервые предложенный принцип измерений был применен для исследования кристаллов германия, легированных сурьмой и имевших удельное сопротивление 0,16 Ом·м. При этом выяснилось, что времена жизни электронов и дырок различались в 4 раза и составляли 0,8 и 0,2 мкс соответственно [14].

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.299

Опыты по определению объемного времени жизни как объективной характеристики материала и скорости поверхностной рекомбинации, характеризующей обработку конкретного образца, были проведены совместно с сотрудниками Физико-технического института на монокристаллах кремния с удельным сопротивлением 130 Ом·м. Все образцы были из одной заготовки, но имели разную обработку поверхности. При этом оказалось, что с погрешностью порядка 5 % объемное время жизни во всех образцах одинаково и составляет 340 мкс. Скорость поверхностной рекомбинации при этом определялась обработкой поверхности образца и изменялась от 10^3 см/с для полированных образцов до 10^5 см/с для шлифованных [6].

Совместно с сотрудниками Государственного института редкометаллической промышленности мы предложенными методами исследовали технологические возможности повышения времени жизни носителей заряда в монокристаллах антимонида индия. При этом было установлено, что при обработке кристаллов атомарным водородом в поверхностном слое образца глубиной 8-15 мкм время жизни увеличивается в 6-8 раз по сравнению с объемным, которое не изменяется и составляет примерно 4 мкс. Было также установлено, что выращивание монокристаллов в сильном магнитном поле (B = 0,15 Тл) повышает объемное время жизни носителей заряда в антимониде индия примерно в 2 раза [22].

В сплаве кадмий – ртуть – теллур $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te$ из экспериментальных температурных зависимостей времен жизни, полученных предложенным методом для электронов и дырок, удалось вычислить концентрацию в исследованном материале центров рекомбинации, которая составила $1{,}8\cdot10^{14}$ см$^{-3}$ [20].

В монокристаллах кремния с удельным сопротивлением 160 Ом·м лазерно-интерферометрическим методом была исследована диффузионная длина носителей заряда. Было установлено, что защита поверхности кремния слоем диэлектрика увеличивает этот параметр в 1,5 раза [27]. Был также исследован сверхчистый кремний [26].

Кроме чисто научных приложений, предложенные методы позволили создать полуавтоматический лазерный тауметр для промышленного использования, который позволяет разбраковать по величине времени жизни носителей кассету с 25 стандартными кремниевыми пластинами за 10 мин.

Заключение. Таким образом, проведенные теоретические расчеты и экспериментальные исследования показали, что предложенный физический механизм абсорбционно-интерференционного взаимодействия двух лазерных излучений с различной длиной волны является хорошей основой для создания методов и средств бесконтактного контроля электрофизических параметров полупроводников и диэлектриков.

Это время жизни носителей заряда, причем раздельно электронов и дырок; параметры центров рекомбинации, а именно их концентрация и сечения захвата; объемное время жизни и скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда, а также их диффузионная длина носителей заряда. Проводимые измерения являются локальными и неразрушающими. Локальность определяется диаметрами используемых лазерных лучей. Важно и то, что не требуется специальной подготовки образцов для проведения измерений – можно использовать пластины непосредственно из технологического процесса. Сохранение параметров материала после измерений позволяет проводить на исследованных образцах технологические процессы дальше, в частности, изготовление полупроводниковых приборов.

Метод успешно апробирован на сериях образцов таких материалов как германий, кремний, антимонид индия и сплав кадмий – ртуть – теллур с различным состоянием поверхности, в том числе покрытых прозрачными защитными слоями. Он может быть использован при проведении научных исследований и в металлургической, и электронной промышленности.

Вместе с тем множество уже известных и вновь создаваемых полупроводниковых материалов и структур требует высокого разнообразия методов и средств измерений, поэтому процесс поиска и разработки таких методов продолжается [30, 31].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров С.Е.* Технология полупроводниковых материалов / С.Е.Александров, Ф.Ф.Греков. СПб: Лань, 2012. 240 с.

2. *Беляев А.Е.* Физические методы диагностики в микро- и наноэлектронике / А.Е.Беляев, Р.В.Конакова, Е.Ф.Венгер. Харьков: ИСМА, 2011. 384 с.

3. Бесконтактный лазерный интерференционный метод неразрушающего исследования рекомбинационных характеристик электронов и дырок в полупроводниках / А.Г.Арешкин, Л.Е.Воробьев, А.С.Иванов, К.Ф.Комаровских, Д.Г.Летенко, А.Б.Федорцов, Ю.В.Чуркин // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 1992. Т. 56. № 12. С. 121-129.

4. *Богатыренко В.В.* Измерение скорости поверхностной рекомбинации и объемного времени жизни в пластинах Si по кинетике избыточного теплового излучения / В.В.Богатыренко, А.В.Зиновчук // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 1. С. 62-66.

5. *Груздов В.В.* Контроль новых технологий в СВЧ-электронике / В.В.Груздов, Ю.В.Колковский, Ю.А.Концевой. М.: Техносфера, 2016. 328 с.

6. Контроль объемного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в полупроводниках методом инфракрасного лазерного зондирования / В.Б.Воронков, А.С.Иванов, К.Ф.Комаровских, Д.Г.Летенко, А.Б.Федорцов, Ю.В.Чуркин // Журнал технической физики. 1991. Т. 61. № 2. С. 104-108.

7. *Крутецкий И.В.* Оптическое усиление в системе лазер-фотопроводник / И.В.Крутецкий, А.Б.Федорцов // Письма в журнал технической физики. 1977. Т. 3. № 1. С. 3-6.

8. *Мадьяров В.Р.* Измерение параметров электронного переноса в полупроводниках с помощью эффекта Фарадея в миллиметровом диапазоне // Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика. 2016. № 6 (188). С. 101-105.

9. *Манухов В.В.* Лазерно-интерференционный метод определения длины диффузии носителей заряда в полупроводниках / В.В.Манухов, А.С.Иванов, А.Б.Федорцов // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 9. С. 1153-1159.

10. *Мосс Т.* Полупроводниковая оптоэлектроника: Пер. с англ. / Т.Мосс, Г.Баррелл, Б.Элис. М.: Мир, 1977. 366 с.

11. *Сахаров Б.А.* Металлургия и технология полупороводниковых материалов. М.: Метллургия, 1972. 544 с.

12. *Сорокин В.С.* Материалы и элементы электронной техники / В.С.Сорокин, Б.Л.Антипов, Н.П.Лазарева. СПб: Лань, 2015. 408 с.

13. *Смирнов В.И.* Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур. Ульяновск: Изд-во Ул. ГТУ, 2012. 75 с.

14. *Федорцов А.Б.* Раздельное определение времен жизни неравновесных электронов и дырок в полупроводниках интерференционным методом / А.Б.Федорцов, Ю.В.Чуркин // Письма в журнал технической физики. 1988. Т. 14. № 4. С. 321-324.

15. *Штурбин А.В.* Определение диффузионно-рекомбинационных параметров полупроводников бесконтактным методом / А.В.Штурбин, В.А.Шалыгин, В.И.Стафеев // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29. № 11. С. 2930-2052.

16. Экспериментальное обнаружение абсорбционно-интерференционного взаимодействия света в полупроводнике / Ю.В.Выжигин, К.Ф.Комаровских, А.Б.Федорцов, Ю.В.Чуркин // Физика и техника полупроводников. 1985. Т. 2. № 9. С. 17-47.

17. *Antishin V.S.* Local testing the hole concentration composition in plates of Cd-Hg-Te / V.S.Antishin, V.A.Shalygin, A.V.Shturbin // Defektoscopiya. 2005. № 3. P. 11-16.

18. A fast operating laser devise for measuring thicknesses of liquid and solid films / A.B.Fedortsov, D.G.Letenko, Ju.V.Churkin, I.A.Torchinsky, A.S.Ivanov // Review of scientific instruments. 1992. Vol. 63. № 7. P. 3579-3582.

19. Bulk lifetime and surface recombination measurements on high parity silicon by a laser modulation technique / A.B.Fedortsov, D.G.Letenko, Yu.V.Churkin, L.M.Tsentsiper, I.Vedde // Proceedings of electrochemical Society. 1996. Vol. 96. № 13. P. 481-489.

20. Contactless local determination of recombination center parameters in Cd Hg Te by infrared laser interferometry / A.B.Fedortsov, D.G.Letenko, A.Yu.Polyakov, V.I.Stafeev, L.E.Vorobjev // Semiconductor Science and Technology. 1994. Vol. 9. № 1. P. 69-76.

21. *Chan D.S.H.* A direct method for extraction of diffusion length and surface recombination velocity from an EBIC line scan: planar junction configuration / D.S.H.Chan, V.K.S.Ong, J.C.H.Phang // IEEE transactions on electron devices. 1982. Vol. 42. № 5. P. 185-187.

22. Excess carrier lifetime measurements in indium antimonite using a con-tactless laser technique / A.B.Fedortsov, D.G.Letenko, Yu.V.Churkin, V.N.Sawateev // Journal of Material Science: Materials in Electronics. 1993. Vol. 4. № 3. P. 203-207.

23. *Gaury B.* Probing surface recombination velocity in semiconductors using two-photon microscopy. / B.Gaury, P.Haney // Journal of applied physics. 2016. Vol. 119. P. 105-125.

24. High frequency method to determine SiC crystal conductivity / A.V.Shturbin, I.E.Titkov, V.Yu.Panarin, R.F.Witman // Materials science in semiconductor processing. 2001. Vol. 4. № 1-3. P. 205-207.

25. Imaging method for laterally resolved measurement of minority carrier densities and lifetimes / J.Izenberg, S.Riepe, S.W.Glunz, W.Warta // Journal of applied physics. 2003. Vol. 93. № 4. P. 4268-4275.

26. *Kelly-Zion P.* Application of laser interferometry for transient film thickness measurements / P.Kelly-Zion, W.Collins, D.Glawe // Proceedings of the ASME heat transfer fluids Engineering conference. 2010. P. 104-107.

27. *Linnros J.* A new technique for depth resolved carrier recombination measurements applied to proton irradiated transistors / J.Linnros, P.Norlin, A.Hallen // IEEE transactions on electron devices. 1993. Vol. 40. № 11. P. 2065-2073.

28. *Nosoko T.* Improved interferometer for measuring unsteady film thickness / T. Nosoko, J.H. Mori, T. Nagata // Review of scientific instruments. 1996. Vol. 67. № 8. P. 2685-2690.

29. *Polla D.L.* Determination of carrier lifetime in silicon by optical modulation // IEEE transactions on electron devices letters. 1983. EDL-4. P. 185-187.

30. *Schuze H.J.* Carrier lifetime analysis by photo conductance decay and free carrier absorption measurements / H.J.Schuze, A.Frohnmeyer, F.J.Niedernostheide // Journal of electrochemical society. 2001. Vol. 148. № 11. P. G655-G661.

31. *Schroder D.*K. Semiconductor material and device characterization. NY. Willey-Inter-science IEEE, 2006. 781 p.

Авторы: **А.Б. Федорцов,** *д-р. физ.-мат. наук, профессор, borisovitch-f@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **А.С. Иванов,** *канд. техн. наук, доцент, ivalex58@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 11.05.2017.
Статья принята к публикации 04.05.2018.