

УДК 539.25:621.383.4

Характеризация фоточувствительных резистивных элементов на основе КРТ в режиме наведенного тока

О. В. Смолин, Е. В. Сусов, Е. Б. Якимов
ФГУП "Альфа", Москва, Россия

Проведены исследования фоточувствительных резистивных элементов (ФЧЭ) на основе КРТ в растровом электронном микроскопе методом наведенного тока. Измерено распределение тока, возникающего в ФЧЭ при его возбуждении электронным пучком в зависимости от положения. Из сравнения с рассчитанными распределениями оценены значения диффузионной длины и скорости рекомбинации на границах элементов, связанной с дефектами, возникающими при ионном травлении. Показано, что такие исследования позволяют выявлять рекомбинационные дефекты микронных размеров.

Параметры ФЧЭ в значительной степени определяются дефектами, возникающими в процессе выращивания и/или изготовления элементов и влияющими на такие характеристики материала, как подвижность носителей заряда, а также эффективное время жизни и диффузионная длина неравновесных носителей заряда. Этим и обусловлен интерес к развитию методов диагностики данных структур, позволяющих оценивать как эффективную скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда, так и ее пространственное распределение для более надежного выявления источников деградации параметров элементов.

Одним из таких методов является метод наведенного электронным пучком тока (НТ), в котором неравновесные носители заряда возбуждаются сфокусированным электронным пучком растрового электронного микроскопа [1–3]. Этот метод широко применяется для характеристики барьерных структур (p - n -переходов или барьеров Шоттки) и позволяет определять диффузионную длину, а также выявлять дефекты, влияющие на скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда. В таких структурах ток, возникающий в цепи при возбуждении исследуемой структуры сфокусированным электронным пучком, существенно превышает темновой ток, и чувствительность метода практически не зависит от размеров структуры. К настоящему времени предложен целый ряд способов определения диффузионной длины в таких структурах методом НТ [3]. При характеристике фоторезисторов генерируемые электронным пучком неравновесные носители заряда изменяют сопротивление элемента, что в свою очередь регистрируется по изменению тока в цепи исследуемого фоторезистора. Очевидно, что относительное изменение сопротивления фоторезистора при локальном возбуждении будет существенно зависеть от соотношения между количеством неравновесных и равновесных носителей

заряда. Поэтому при исследовании пространственного распределения отклика элемента чувствительность метода понижается при увеличении размеров ФЧЭ. Такое понижение в принципе может быть компенсировано повышением уровня возбуждения, однако оно может приводить к изменению скорости рекомбинации и параметров амбиполярной диффузии и дрейфа. Кроме того, если в барьерных структурах пространственное разрешение метода НТ достигает величины порядка размеров области генерации электронно-дырочных пар и обычно составляет несколько микрон, возможность достижения такого разрешения на структурах с омическими контактами совсем не очевидна.

В настоящей статье проведены исследования методом НТ ФЧЭ, изготовленных из гетероструктур на основе CdHgTe с латеральными размерами 35–50 мкм. Показано, что даже при пространственном разрешении порядка нескольких микрон и локальных уровнях возбуждения $\Delta n/n \sim 1$ может быть получен вполне измеримый сигнал, позволяющий оценивать основные электрические параметры материала ФЧЭ. Получены распределения НТ в зависимости от координат возбуждающего пучка. Сравнение с расчетными зависимостями позволило оценить скорость рекомбинации на боковых сторонах элемента и n^+ - n омических контактах, а также эффективную диффузионную длину неравновесных носителей заряда. Показано, что такие исследования позволяют выявлять рекомбинационные дефекты микронных размеров.

Методика

В статье исследованы линейки ФЧЭ, изготовленные на гетероструктурах, состоящих из эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0,22$) n -типа проводимости толщиной 4,3 мкм, расположенных между двумя варизонными слоями и выра-

щенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [4]. Концентрация n и подвижность электронов μ в рабочем слое, измеренные при 78 К, равнялись $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $68\,000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно, время жизни неосновных носителей заряда — 5,5 мкс. Исследовались ФЧЭ размерах 35×35 и 50×50 мкм в растровом электронном микроскопе JSM 840A (Jeol) при температуре порядка 90 К, энергии первичных электронов 35 кэВ и токе пучка порядка 10^{-10} А. При этом на исследуемые структуры подавалось напряжение до 50 мВ и измерялось изменение тока в цепи ФЧЭ как функция положения электронного пучка. В результате получались двумерные распределения отклика ФЧЭ при разных приложенных напряжениях, которые можно рассматривать как распределения фоточувствительности ФЧЭ, поскольку при использованной энергии электронов примерно 30 % энергии пучка поглощается в активном слое, и поэтому локальная генерация неравновесных носителей заряда сфокусированным электронным пучком качественно подобна генерации сфокусированным оптическим пучком. При использованных условиях возбуждения величина наведенного электронным пучком тока в ФЧЭ размером 35×35 мкм достигала примерно 10 % от значения темнового тока. При этом, как показали наши расчеты, уровень возбуждения $\Delta n/n$ достигал значений ~ 1 даже в максимуме распределения концентрации неравновесных носителей заряда Δn . Для расчета двумерного распределения фоточувствительности ФЧЭ методом функции Грина решалось двумерное линеаризованное диффузионно-дрейфовое уравнение фотопроводимости [5, 6] с конечной скоростью поверхностной рекомбинации на боковых гранях. Влияние n^+ - n -контактов также учитывалось путем введения на них конечной скорости поверхностной рекомбинации [7]. Поскольку слой КРТ был заключен между двумя варизонными слоями, скорость рекомбинации на верхней и нижней гранях элемента предполагалась близкой к 0, а распределение неравновесных носителей заряда предполагалось однородным по толщине элемента.

Результаты исследований и обсуждение

На рис. 1 приведены примеры распределения НТ в ФЧЭ размером 35×35 мкм при разной полярности приложенного напряжения (± 50 мВ). Видно, что эти распределения неоднородны по площади элементов и зависят от приложенного напряжения. В то же время следует отметить, что приведенные распределения чувствительности достаточно плавные, и на них не выявляются дефекты, заметным образом влияющие на скорость рекомбинации.

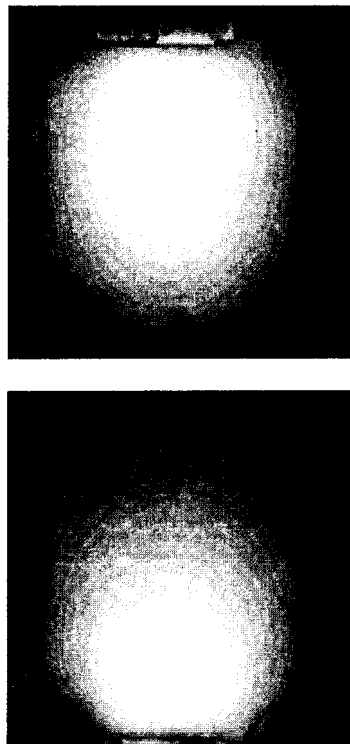


Рис. 1. Изображения ФЧЭ в режиме НТ при разной полярности приложенного напряжения 50 мВ.

Размер изображений $42,5 \times 42,5$ мкм.
Величина НТ представлена с шагом 5 %.

Распределение НТ вдоль ФЧЭ (в направлении приложенного электрического поля) качественно хорошо согласуется с предсказаниями одномерной модели фотопроводимости [5]. В то же время уменьшение НТ в поперечном направлении при приближении электронного зонда к боковым сторонам элемента свидетельствует о повышенной скорости рекомбинации на боковых сторонах и, по-видимому, связано с дефектами, введенными при ионном травлении. Профили распределения НТ вдоль и поперек ФЧЭ, полученные при сканировании электронного пучка на середине длины и ширины ФЧЭ, соответственно, представлены на рис. 2. Здесь же показаны моделированные профили, наиболее близко согласующиеся с экспериментальными. Следует отметить, что моделирование позволяет достаточно хорошо описать профили тока поперек ФЧЭ и несколько хуже вдоль него. По-видимому, это связано с тем, что при моделировании решалось линеаризованное уравнение фотопроводимости, в то время как при уровнях возбуждения $\Delta n/n \sim 1$ оно уже существенно нелинейно [6]. Кроме того, наблюдаемое расхождение может быть обусловлено недостаточно адекватным приближением, использованным в модели для описания реальных n^+ - n -контактов и/или необходимостью учета вклада варизонных слоев на распределение и транспорт неравновесных носителей заряда.

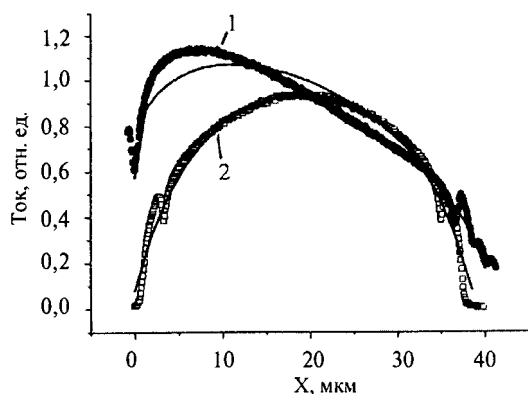
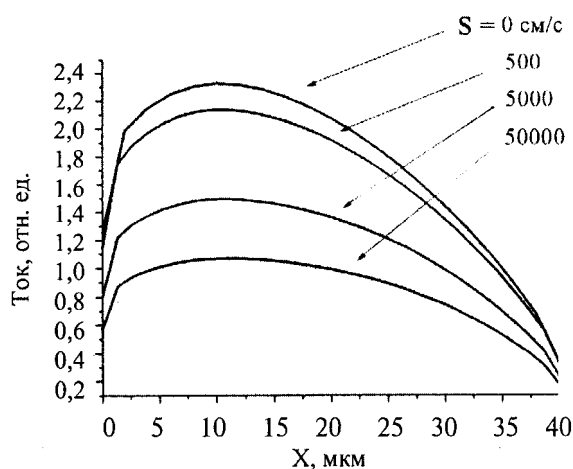


Рис. 2. Измеренные и рассчитанные (сплошные линии) зависимости наведенного тока от положения зонда при его движении вдоль (1) и поперек (2) ФЧЭ при $U = 50$ мВ

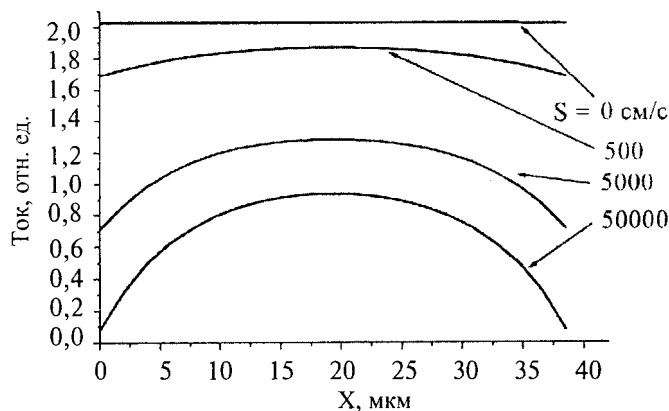
Тем не менее, использованная подгонка экспериментальных профилей рассчитанными позволяет оценить параметры структуры ФЧЭ, для которых получены следующие значения: диффузионная длина неравновесных носителей заряда $L = 8,5$ мкм, скорость рекомбинации на боковых сторонах $S = 5 \cdot 10^4$ см/с, амбиполярная подвижность $\mu = 500$ см²·В⁻¹·с⁻¹, эффективная скорость рекомбинации на n^+ - n -контактах $8 \cdot 10^3$ см/с. Используя полученные значения, можно моделировать характеристики ФЧЭ при варьировании, например, скорости рекомбинации на боковых сторонах S , что позволяет предсказать изменение характеристик ФЧЭ при усовершенствовании технологического процесса структурирования. Результаты таких расчетов приведены на рис. 3, а, б вдоль и поперек ФЧЭ, соответственно. Видно, что при использованном значении $L = 8,5$ мкм уменьшение S может привести к примерно двукратному повышению сигнала. При меньших величинах L относительное

повышение сигнала будет меньше, а при больших значениях L больше.

При полученном значении диффузионной длины рожденные пучком неравновесные носители заряда распределяются достаточно далеко от области генерации. В связи с этим возникает вопрос о возможности обнаружения в ФЧЭ методом НТ рекомбинационных дефектов, если их размеры существенно меньше размеров самого ФЧЭ. Для ответа на этот вопрос было проведено моделирование распределения неравновесных носителей заряда и показано, что даже при полученных значениях диффузионной длины неравновесные носители заряда в основном распределены в области с размерами порядка 5–7 мкм. Кроме того, были проведены исследования элементов с повреждениями на поверхности. Один из примеров такого исследования приведен на рис. 4, где показаны изображение дефекта на поверхности в режиме вторичных электронов и изображение этого же элемента в режиме НТ. Видно, что размеры изображения дефекта в режиме НТ (порядка 6 мкм) заметно превышают его геометрические размеры, поэтому его влияние на НТ, вероятнее всего, определяется повышением локальной скорости рекомбинации. Следует также отметить, что размеры изображения дефекта в режиме НТ хорошо коррелируют с рассчитанными размерами области локализации неравновесных носителей заряда. Таким образом, из представленных результатов следует, что на ФЧЭ размером 50×50 мкм даже рекомбинационные дефекты с размерами 2–3 мкм способны оказывать заметное влияние на величину НТ и могут быть выявлены этим методом.



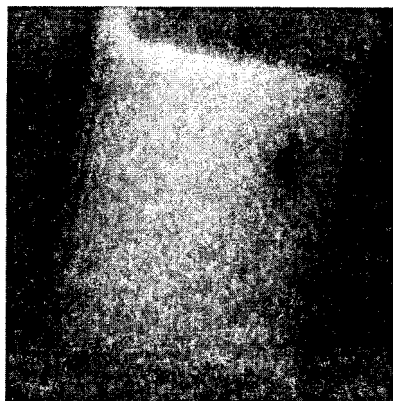
а



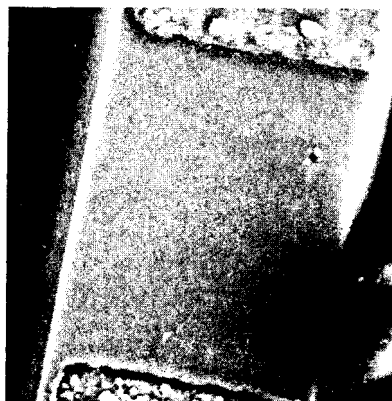
б

Рис. 3. Рассчитанное изменение профиля при изменении скорости поверхностной рекомбинации на боковых сторонах S :

а — вдоль ФЧЭ; б — поперек ФЧЭ



а



б

Рис. 4. Изображение ФЧЭ в режимах НТ (а) и вторичных электронов (б).
Размер изображения 70×70 мкм

Таким образом, продемонстрированы возможности метода НТ в растровом электронном микроскопе для характеристики резистивных ФЧЭ малых размеров. Показаны возможности определения параметров активного слоя в готовом элементе и выявления рекомбинационных дефектов микронных размеров.

Литература

1. Leam H. J. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. R51.
2. Якимов Е. Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 1992. Т. 56. С. 31.
3. Якимов Е. Б. // Зав. лаб. 2002. Т. 68. № 1. С. 63.
4. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. L., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G. // J. Cryst. Growth. 1996. V. 159. P. 1161.
5. Rittner E. S. // Photoconduct. Conf. Ed. by Breckenridge R. G. (Wiley, N. Y.). 1956. P. 215.
6. Ishaque A. N., Howard J. W., Becker M., Block R. C. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. 307.
7. Smith D. L. // Ibid. 1984. V. 56. P. 1663.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

EBIC characterization of HgCdTe based photoconductive elements

O. V. Smolin, E. V. Susov, E. B. Yakimov
Alpha Federal State Unitary Enterprise, Moscow, Russia

Investigations of $Hg_{0.22}Cd_{0.78}Te$ based photoconductive elements have been carried out the scanning electron microscope in the Electron Beam Induced Current (EBIC) mode. Distributions of current induced by a focused e-beam in the elements are measured as a function of beam position. Fitting the measured distributions by calculated ones allows to estimate values of diffusion length and of recombination velocity on the lateral edges of elements associated with defects induced due to ion milling. It is shown that besides the diffusion length and recombination velocity measurements such investigations allow to reveal the extended recombination defects of micron size.