

# Исследование качества полупроводниковых структур методом фотоответного изображения

**В статье описывается метод получения фотоответного изображения для контроля и анализа качества полупроводниковых компонентов, основанный на измерении локального фототока в структурах с р-п-переходом и отображения его значений на экране монитора либо на экране телевизионной трубки в виде фотоконтрастного рисунка.**

Валерий Григорьян,

Николай Горюнов

Федор Маняхин,  
д. ф-м. н.

fman@misis.ru

Валерий Бессонов,  
Александр Кодак

Качество работы активных полупроводниковых структур, к которым относятся диоды, транзисторы, интегральные микросхемы и др., во многом зависит от состояния их поверхностного слоя в области выхода на поверхность р-п-перехода. Выявление токов поверхностных утечек по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) не дает представления о месте их локализации, а следовательно, и полного понимания механизма их образования.

Для визуализации распределения дефектных областей по поверхности полупроводниковых структур используют различные методы, основанные на контрасте их электрической активности или на контрасте их оптических свойств. Эти методы дают как качественные, так и количественные результаты [1, 2].

Один из них, метод растрово-электронной микроскопии (РЭМ), основанный на использовании эффекта наведенных токов при взаимодействии электронного луча с полупроводником, обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью по пространственным координатам.

Однако он имеет ряд серьезных недостатков, к основным из которых можно отнести: сложность обслуживания, требующего наличия подготовленного, квалифицированного персонала; радиационную опасность; необходимость размещения исследуемых структур в вакуумной среде и другие.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения светового зонда малого диаметра для получения видимого изображения реакции кристалла полупроводниковой структуры на воздействие квантов света различной энергии. Этот метод получил название растровой оптической микроскопии (РОМ) [3]. В процессе работы проводились сравнения различных аппаратных решений этого метода. В частности, решались задачи компьютерного управления экспериментальными измерениями и применения в качестве источников света высокоэффективных светодиодов синего, зеленого и белого свечения на основе нитридных соединений.

## 1. Физические основы метода

Описываемый метод основан на внутреннем фотоэффекте, возникающем при поглощении квантов света полупроводником. Поглощенные кванты, энергия которых должна быть больше энергии запрещенной зоны полупроводника, генерируют избыточные носители заряда, которые в свою очередь могут создать фототок в электрическом поле или диффузионный фототок.

Концентрация избыточных носителей заряда, генерируемых в приповерхностной области возбуждающим монохроматическим световым потоком  $I_0$ , с учетом диффузии и поверхностной рекомбинации, когда коэффициент поглощения достаточно велик и диаметр светового пятна много больше диффузионной длины носителей заряда, определяется по формулам [4]:

$$\Delta p(d) = \frac{\beta(1-R_s)^2 I_0 \tau_p \alpha}{h\nu(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[ \frac{\alpha L_p^2 + s\tau_p}{L_p + s\tau_p} \exp(-d/L_p) - \exp(-\alpha d) \right];$$

$$\Delta n(d) = \frac{\beta(1-R_s)^2 I_0 \tau_n \alpha}{h\nu(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \left[ \frac{\alpha L_n^2 + s\tau_n}{L_n + s\tau_n} \exp(-d/L_n) - \exp(-\alpha d) \right] \quad (1)$$

где  $\beta$  — внутренняя квантовая эффективность;  $R_s$  — коэффициент отражения;  $\alpha$  — коэффициент поглощения квантов;  $h\nu$  — энергия квантов света;  $L$  — диффузионная длина носителей заряда (н. з.) — индекс внизу указывает на тип н. з.;  $s$  — скорость поверхностной рекомбинации;  $\tau$  — время жизни н. з. (индекс внизу указывает на тип н. з.);  $d$  — толщина слоя до области пространственного заряда р-п-перехода.

Избыточные носители заряда диффундируют также вдоль поверхности в радиальных направлениях относительно центра светового пятна. Плотность диффузионного потока определяется интегральной концентрацией избыточных носителей заряда  $\Delta p$ ,  $\Delta n$  под световым пятном:

$$\Delta p = \int_0^d \Delta p(x) dx = \frac{\beta(1-R_s)^2 I_0 \tau_p \alpha}{hv(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[ \frac{\alpha L_p^2 + s\tau_p}{L_p + s\tau_p} L_p (1 - \exp(-d/L_p)) - \frac{1}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha d)) \right];$$

$$\Delta n = \int_0^d \Delta n(x) dx = \frac{\beta(1-R_s)^2 I_0 \tau_n \alpha}{hv(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \left[ \frac{\alpha L_n^2 + s\tau_n}{L_n + s\tau_n} L_n (1 - \exp(-d/L_n)) - \frac{1}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha d)) \right]. \quad (2)$$

Избыточные носители заряда, достигающие области пространственного заряда р-п-перехода, захватываются его полем и создают фототок. Величина фототока в реальных р-п-структурах зависит от многих факторов: плотности светового потока к световому пятну, глубины залегания р-п-перехода, величины скорости поверхностной рекомбинации, диффузионной длины носителей заряда, аномалий в области р-п-перехода и др. Последний из указанных факторов и является предметом исследования.

К аномалиям в области р-п-перехода относятся скопления точечных дефектов, дислокации, проколы р-п-перехода, каналы поверхностной утечки и пр.

Рассмотрим схему растрового оптического микроскопа, позволяющего выявлять такие места в активной структуре с р-п-переходом. На рис. 1 изображена блок-схема микроскопа.

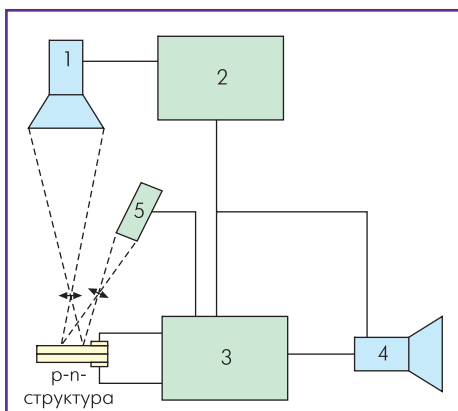


Рис. 1. Блок-схема растрового оптического микроскопа (РОМ) «Фотоскан»:

- 1 — сканирующая телевизионная трубка;
- 2 — блок синхронизации и развертки;
- 3 — блок усиления сигналов фотоответа;
- 4 — телевизионная трубка отображения раstra фотоответа;
- 5 — фотоэлектронный умножитель.

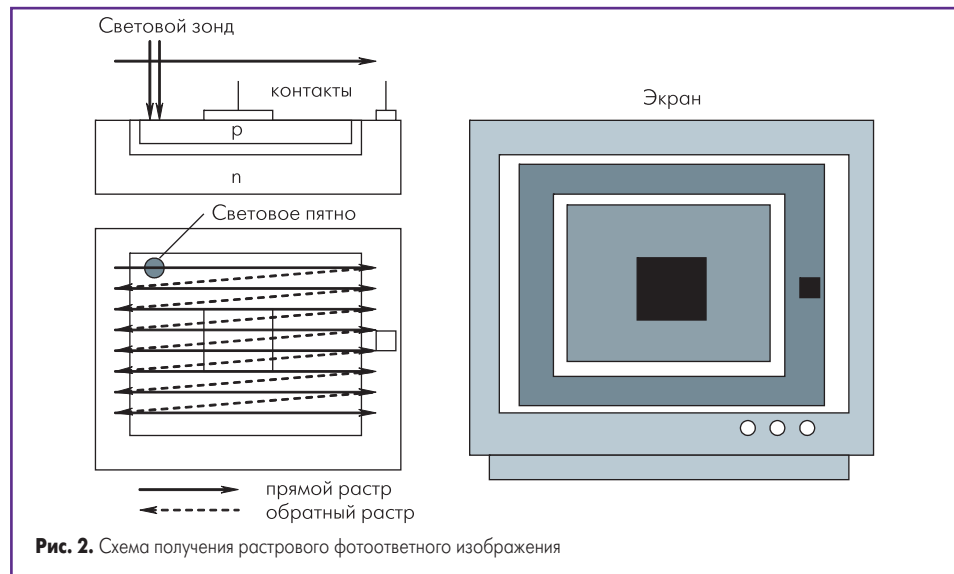


Рис. 2. Схема получения растрового фотоответного изображения

Световой зонд создается электронно-лучевой трубкой 1 со слабым послесвечением и высокой яркостью люминофора. Цвет свечения раstra трубки оранжевый, что позволяет генерировать электронно-дырочные пары в полупроводниках, ширина запрещенной зоны которых меньше 2 эВ. Фототок, возникающий в диодной структуре в результате локальной генерации электронно-дырочных пар световым зондом, преобразуется в напряжение и усиливается усилителем 3. Полученный сигнал передается на трубку изображения 4. Блок синхронизации и развертки 2 позволяет в реальном масштабе времени получать так называемое фотоответное растровое изображение (ФОИ) силы фототока на экране телевизионной трубки, синхронизированное с положением светового пятна на поверхности р-п-структуры. Схема создания раstra показана на рис. 2. Наиболее светлые по контрасту места — выход р-п-перехода на поверхность структуры, так как в них происходит наиболее полное преобразование светового потока в фототок. В области залегания р-п-перехода, параллельного поверхности кристалла, фототок меньше из-за потерь в р-слое на рекомбинацию, вследствие чего контраст изображения менее яркий. В местах расположения контактов поглощения света нет, поэтому эти места на экране наиболее темные. Аппаратное решение устройства фотосканирования позволяет получать инверсное по цвету изображение на экране телевизионной трубки. Кроме того, отраженный луч светового зонда может приниматься фотоэлектронным умножителем 5 (рис. 1), что позволяет получать растровый снимок поверхности и идентифицировать место расположения аномальных областей.

В целом, метод фотоответного изображения лишен основных недостатков РЭМ. Он экологически безопасен, не требует высококвалифицированного персонала, позволяет проводить исследования полупроводниковых структур в естественной для них атмосфере или же в заданных условиях окружающей среды.

Недостатками метода ФОИ являются невозможность запоминания раstra в электрон-

ном виде и невысокая относительно РЭМ пространственная разрешающая способность (диаметр пятна светового зонда не менее 5 мкм).

Разработанное авторами механическое двухкоординатное сканирующее устройство с применением шаговых двигателей позволяет оцифровывать данные параметров ФОИ и автоматически управлять процессом сканирования. Цифровая форма фотоответного сигнала обрабатывалась по специальным программам.

В таком устройстве в качестве источников света для светового зонда могут использоваться высокоэффективные светодиоды синего и зеленого свечения на основе нитридных соединений, а также светодиоды красного свечения на основе AlInGaP. Оптическая система фокусирования дает возможность получать диаметр светового пятна до 5 мкм. В настоящее время производятся фиолетовые и ультрафиолетовые светодиодные источники, позволяющие получать более эффективное преобразование света в фототок.

## 2. Объекты исследования, экспериментальные результаты и их обсуждение

Объектами исследований с применением РОМ «Фотоскан» (рис. 1) были планарные кремниевые структуры мощных транзисторов КТ802, германиевые конверсионные транзисторы ГТ322, светодиоды с квантовыми ямами на основе соединения AlInGaP красного диапазона спектра. На механическом сканере исследовали кремниевые фотоэлектронные на основе р-і-п-структур.

Кристаллы транзисторов КТ802 имели размер 5×4 мм. Область эмиттерного перехода представляет собой гребенчатую структуру. Площадь кристалла транзистора ГТ322 — 0,8×0,8 мм. Обе структуры были выбраны по аномалиям ВАХ эмиттерных переходов, которые имели малое обратное пробивное напряжение. На рис. 3 и 4 представлены ФОИ распределения фототока по площади этих структур, снятые при обратных напряжениях смещения, близких к пробивным.

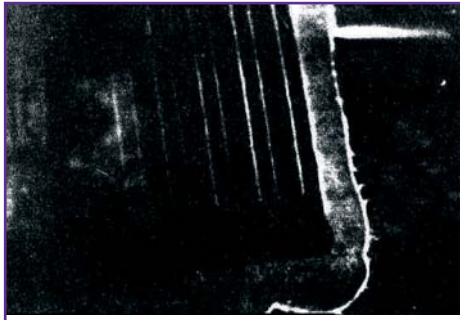


Рис. 3. Растровое отображение фотоответа от планарной структуры транзистора KT802

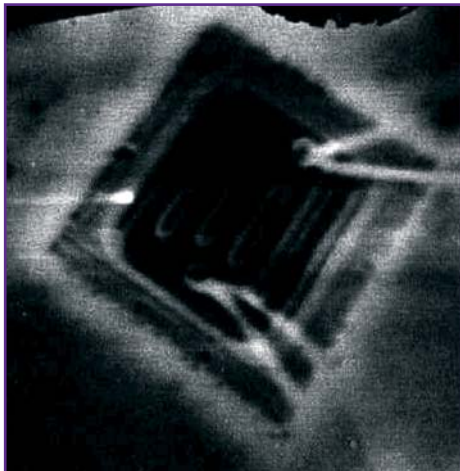


Рис. 4. Растровое отображение фотоответа от планарной структуры транзистора PT322

Хорошо проявились области выхода p-n-перехода на поверхность в виде гребенчатых полос. Однако самым интересным оказалось появление на ФОИ обеих структур ярких кометообразных участков, начинающихся на месте выхода на поверхность p-n-перехода. Аналогичный эффект наблюдали на ФОИ светодиодных структур с квантовыми ямами на основе AlInGaP, у которых были обнаружены большие токи безызлучательной рекомбинации при прямых и обратных напряжениях смещения. В то же время на ФОИ транзисторов и светодиодов эффект появления кометообразных светящихся участков не проявлялся при отсутствии обратного напряжения смещения. Следует заметить, что фотоответное растровое изображение для светодиодов красного свечения получено



Рис. 5. Растровое фотоответное отображение светодиодной структуры красного свечения с квантовыми ямами на основе соединений AlInGaP

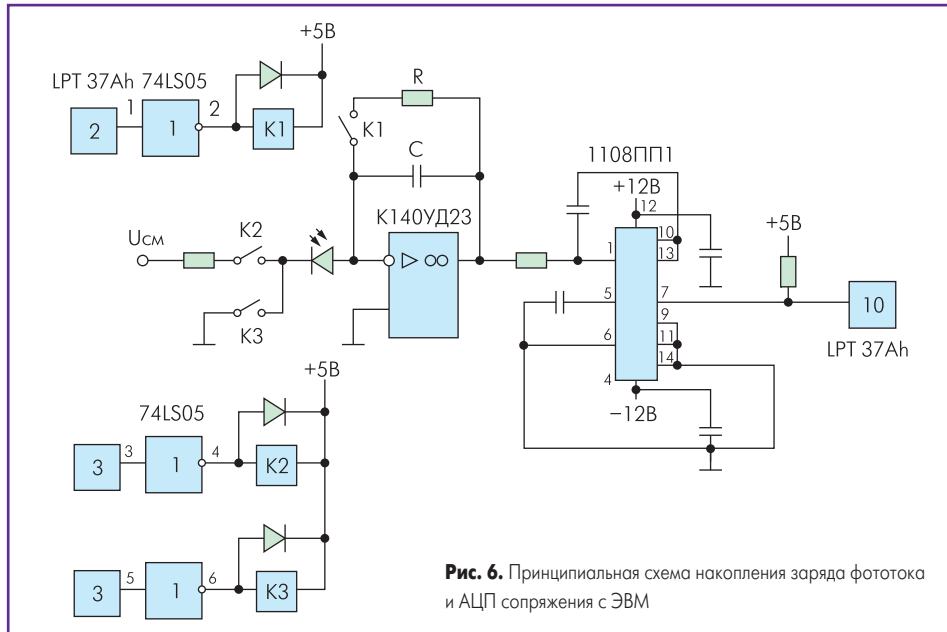


Рис. 6. Принципиальная схема накопления заряда фототока и АЦП сопряжения с ЭВМ

впервые. Сложность его получения заключается не только в малых размерах кристалла (300×300 мкм), но и в том, что толщина активной области квантовых ям, которые поглощают кванты света зонда, суммарно составляет всего 10–16 нм. При такой толщине поглощающего слоя коэффициент поглощения света должен быть не менее  $5 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ . ФОИ светодиодной структуры (рис. 5) показало, что фотогенерация по площади кристалла неоднородна. Центральное темное пятно — это область контактной площадки. Верхняя часть изображения менее яркая, чем часть изображения ниже контактной площадки. Причинами этого, вероятнее всего, являются: 1) неоднородное распределение фазового состава по двумерной структуре квантовых ям; 2) неоднородное распределение точечных дефектов и дислокаций, обуславливающих время жизни генерированных электронно-дырочных пар.

Появление кометообразных участков на ФОИ можно объяснить эффектом лавинного умножения. При обратном смещении на каком-то участке p-n-перехода, близком к напряжению лавинного пробоя, любой поглощенный фотон может вызвать на нем реакцию размножения носителей заряда, а следовательно, увеличение фототока, проявляющееся на ФОИ в виде ярких областей. Их характерный кометообразный вид объясняется последствием этого эффекта вследствие большого времени релаксации процесса лавинного умножения после того, как пятно светового зонда ушло с этого участка. При отсутствии напряжения смещения величина электрического поля в дефектной области недостаточна для лавинного размножения и указанный эффект не проявляется.

При механическом сканировании в работе исследовалась неоднородность фоточувствительности по площади приемной поверхности кремниевых фотодиодов. Световой зонд создавали фокусированием на поверхность фотодиода излучением светодиода белого свечения на основе гетероструктуры AlGaIn/InGaIn, покрытой люминофором алюмоитриевого гра-

ната. Малая величина фототока, создаваемого световым пятном, измерялась в режиме накопления заряда на конденсаторе (рис. 6). Операционный усилитель позволял фиксировать фототок до 0,1 нА. Вследствие того, что неинвертирующий вход операционного усилителя был заземлен, анод исследуемого фотодиода, подключенный к инвертирующему входу, имел нулевой потенциал. При подключении катода фотодиода к земле ключом K3 в нем при освещении создавался идеальный фотогальванический режим, когда темновой ток не проявляет себя. При подключении напряжения смещения к катоду ключом K2 при отключенном K3 создается фотодиодный режим без сопротивления нагрузки. И в том и другом случае ток  $I_{\phi}$  фотодиода протекает через конденсатор C в момент отключения резистора R ключом K1 и заряжает его. На выходе операционного усилителя фиксируется напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , равное напряжению на конденсаторе, пропорциональное фототоку:

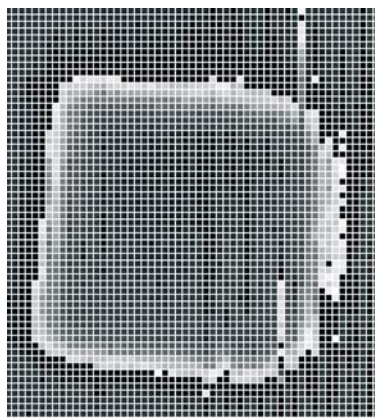
$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\phi} \frac{\Delta t}{C} \quad (3)$$

где  $\Delta t$  — время зарядки конденсатора C.

Таким образом, чувствительность по току можно регулировать как временем измерения, так и величиной емкости конденсатора C. Абсолютная величина фототока в различных областях структуры определяется по тестовому контрасту заданного значения тока зарядки конденсатора C.

Через время  $\Delta t$  все ключи размыкаются и  $U_{\text{ВЫХ}}$  считывается АЦП 1108ПП1 в файл \*.dat компьютера через параллельный порт. После перемещения светового зонда на очередной шаг конденсатор C разряжается через резистор R при замыкании ключа K1. Новый этап измерений наступает, когда ключ K1 размыкается.

На рис. 7 показана двухмерная картина распределения фототока по площади фотодиода. Хорошо видно, что он чрезвычайно неоднороден. Анализ показанного распределения выявил, что основной причиной этого является неодинаковая скорость поверхност-



**Рис. 7.** Фотоответное изображение фотодиодной кремниевой p-i-n структуры, полученное по дискретной матрице фототока с использованием ЭВМ

ной рекомбинации по центру и краям кристалла фотодиода. На эту неоднородность

также оказывает влияние сопротивление слоя, по которому собирается фототок.

Для управления установкой и обработки экспериментальных результатов авторами разработана программа, позволяющая наблюдать двухмерное и трехмерное распределение фототока по поверхности фотодиодов большой площади. Представленный метод наблюдения ФОИ особенно эффективен как экспресс-метод при исследовании солнечных элементов, выявлении в них проколов и токораспределения вблизи контактов.

#### Выводы

Фотоответное отображение приповерхностного слоя полупроводниковых структур является методом визуализации качества их активной области.

Применение ЭВМ позволяет создавать цифровые ФОИ, к которым можно применять методы обработки цифровых фотоизоб-

ражений и проводить количественный анализ фототока по площади структуры.

#### Литература

1. Горюнов Н. Н., Григорьян В. Г. Электрооптические методы выявления дефектов полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 2 «Полупроводниковые приборы». 1972. Вып. 1.
2. Горюнов Н. Н., Григорьян В. Г. Выявление дефектов полупроводниковых приборов методом регистрации рекомбинационного излучения // Электронная техника. Сер. 12 «Качество». 1971. Вып. 3.
3. Григорьян В. Г. Растровый оптический микроскоп — новое устройство контроля качества поверхности полупроводниковых приборов // Электронная промышленность. 1972. № 7.
4. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1986.