

ность метода $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что по отношению к мелким примесям составляет $10^{-4} - 10^{-6}$.

На основе разработанного метода определён энергетический спектр и параметры остаточных и радиационных дефектов в сильно легированном p-GaAs ($E_c - 0,22$; $E_c - 0,41$; $E_c - 0,73$; $E_v + 0,32$; $E_v + 0,10$ эВ).

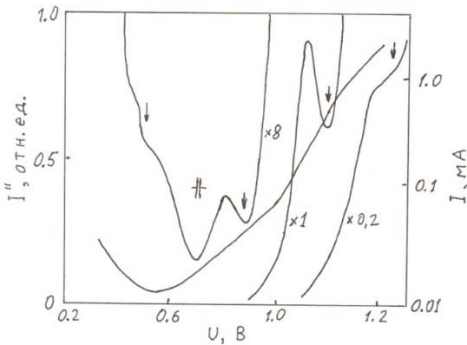


Рисунок 2 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs при $T = 77 \text{ K}$ (стрелками указаны положения максимумов избыточного тока)

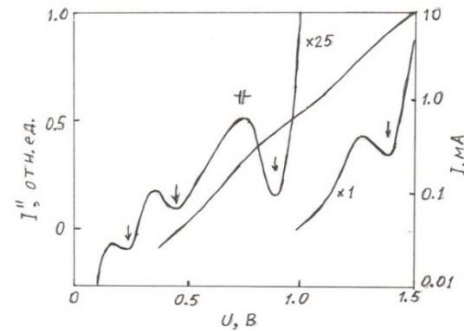


Рисунок 3 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs, облученного быстрыми электронами с энергией 30 МэВ интегральным потоком $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($T = 77 \text{ K}$)

Концентрация технологических дефектов в зависимости от концентрации мелкой примеси изменяется в интервале $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а величина сечения захвата электронов в интервале $10^{-15} - 10^{-17} \text{ см}^2$. Экспериментальные кривые второй производной ВАХ могут быть хорошо объяснены с помощью предложенной модели.

УДК 621.382

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС

Микитевич В.А., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

На этапе производства полупроводниковой микроэлектроники возникает необходимость измерения параметров полупроводниковых пластин. Существующие контактные методы измерения оказывают разрушающее воздействие на исследуемую поверхность, что приводит к уменьшению выхода годных изделий. Поэтому в последнее время все шире применяются бесконтактные зарядочувствительные методы измерения. Методы измерения контактной разности потенциалов (КРП) позволяют косвенно судить о наличии различных дефектов, неоднородности поверхности и т.п. Однако КРП сильно зависит от множества различных факторов, что затрудняет определение корреляции с конкретными физическими величинами. Другой характеристикой поверхности полупроводниковой пластины является поверхностная фото-ЭДС. Существует несколько способов измерения поверхности фото-ЭДС бесконтактным методом:

- 1) с непрерывной сканирующей засветкой образца;
- 2) метод измерения вибрирующим зондом Кельвина;
- 3) импульсный метод;

Метод измерения с непрерывной сканирующей засветкой образца основан на измерении разности работ выхода электрона. Измерение

производится за 2 этапа. На первом этапе измеряется работа выхода электрона при отсутствии освещения, на втором этапе – при непрерывном освещении лучом света. На основе полученных измерений рассчитывается поверхностная фото-ЭДС. Данный метод позволяет определять усредненное значение поверхностной фото-ЭДС по поверхности. При этом размеры области сканирования обычно составляют десятки нанометров [1].

Метод измерения вибрирующим зондом Кельвина аналогичен предыдущему методу. Отличие состоит в том, что используется вибрирующий зонд. Измерение проводится также в два этапа. Измерение также выполняется в два этапа. На первом этапе измерение производится в темноте. На втором этапе измерение производится при равномерном освещении всего образца. На основе разности полученных результатов измерений можно судить лишь о наличии фотоотклика. Такой метод измерения применяется для диэлектриков [2].

Основной недостаток вышеизложенных методов измерения – это необходимость проведения измерений за два этапа, что увеличивает время и погрешность измерений.

Импульсный метод измерения основан на измерении поверхностной фото-ЭДС при воздействии на исследуемый образец импульсным све-

товым излучением. При этом сигнал фото-ЭДС имеет экспоненциальную форму, что затрудняет измерение времени спада в области малых уровней сигнала. Пример воздействующего и ответного сигналов представлены на рисунке 1. Основным недостатком этого метода – сложность формирования идеального прямоугольного импульса светового излучения [3]. При формировании прямоугольного импульса при помощи пикосекундного лазера большое влияние на результат измерения оказывает измерительная схема из-за наличия паразитных составляющих элементов [4].

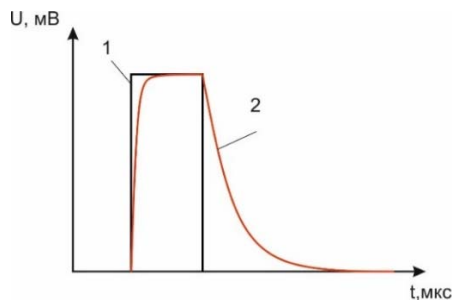


Рисунок 1 – Реакция на воздействие прямоугольным световым сигналом:
1 – кривая воздействующего светового излучения;
2 – кривая фото-ЭДС

Предложен метод измерения поверхностной фото-ЭДС путем воздействия модулированным световым излучением на исследуемую поверхность. Модуляция светового излучения позволяет изменять его интенсивность в широком диапазоне.

Основные преимущества модулированного сигнала:

- 1) возможность получать воздействующий световой сигнал различной формы, например синусоидальной;
- 2) возможность получать измерительный сигнал различной формы;
- 3) возможность проводить измерения в установившемся режиме, а не во время переходных процессов;
- 4) отсутствие высших гармоник в измерительном сигнале;
- 5) уменьшаются частотные требования к усилителям сигнала;
- 6) упрощается фильтрация измерительного сигнала.

На рисунке 2 упрощенно представлен принцип формирования светового излучения по средством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Управляющие импульсы представлены на графике а. На графике б представлена аппроксимированная кривая светового излучения в тех же временных координатах. Аппроксимация выполняется либо между источником сигнала и источником светового излучения (активный или пассивный фильтр), либо на поверхности исследуе-

мого образца. Во втором случае частота ШИМ должна значительно превышать частотные свойства исследуемого образца.

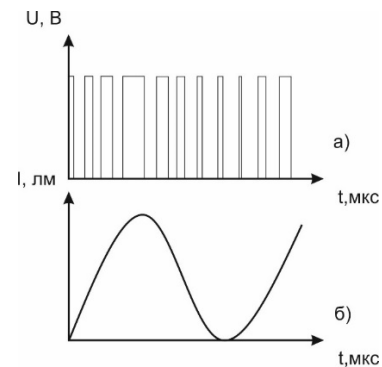


Рисунок 2 – Формирование светового сигнала синусоидальной формы:
а – формирование импульсов управления источником светового излучения; б – кривая светового излучения

При воздействии на исследуемую поверхность синусоидальным световым излучением фото-ЭДС также будет изменяться по синусоидальному закону. В первый момент времени вид воздействующего сигнала и кривой фото-ЭДС представлены на рисунке 3.

После прохождения нескольких периодов воздействующего светового сигнала завершаются переходные процессы и работа продолжается в установившемся режиме. При этом информативной становится основная гармоника измерительного сигнала. Появление высших гармоник связано с возникновением наводок и шумов. Выделение основной гармоник может осуществляться при помощи фильтра. В качестве фильтров используются активные аналоговые или цифровые фильтры.

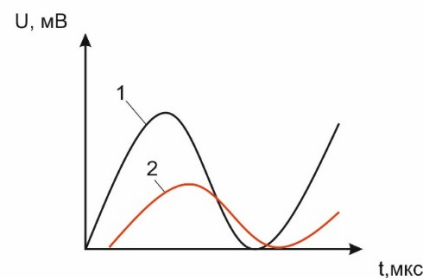


Рисунок 3 – Реакция на воздействие синусоидальным световым сигналом:
1 – кривая воздействующего светового излучения;
2 – кривая фото-ЭДС

Усиление синусоидального сигнала на одной частоте позволяет в значительной степени упростить построение входного усилителя. В отличие от широкополосных усилителей, узкополосные усилители обладают рядом преимуществ:

- 1) малые нелинейные искажения;
- 2) не требуется частотная коррекция;
- 3) нет жестких требований для скорости нарастания сигнала усилителя.

Из вышесказанного следует, что при построении входного усилителя можно использовать низкочастотные усилители. Как правило, низкочастотные усилители обладают большим коэффициентом усиления и малыми входными токами.

Таким образом предложенный метод измерения поверхностной фото-ЭДС обладает рядом преимуществ, которые позволяют в значительной степени упростить конструкцию измерительной системы, а также улучшить точность и достоверность результатов измерения.

Литература

1. Kevin O. A self-tracking method for local surface-photovoltage measurements on semiconducting surfaces /

O. Kevin, S. Speller, I. Barke // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2017. 50 204004

2. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств наноконпозитных полимеров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев, А.В. Кравцевич, И.А. Ровба, В.И. Лысенко, Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

3. Podshivalov, V.N. Determination of the diffusion length of charge minority carriers using digital oscillography of surface photovoltage / V.N. Podshivalov // Russ Microelectron. – 2010, vol. 39 p. 34–41.

4. Dittrich Th. Extraction of source functions of surface photovoltage transients at very short times / Th. Dittrich, O. Garcia Vera, S. Fengler, S. Pineda, S. Bönisch // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90

УДК 535-3: 535.314

ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИКАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Дудчик Ю.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Пучки рентгеновского и гамма-излучения широко используются в науке, технике и медицине. Для их формирования используются различные элементы рентгеновской оптики, такие как зонные пластинки, многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, поликапиллярные линзы Кумахова, конические и параболические монокапилляры, многослойные зеркала, зеркала скользящего падения. Каждый из указанных элементов имеет свой собственный энергетический диапазон использования, однако для фотонов с энергией больше 100 кэВ эффективность указанных элементов падает. Что касается гамма-лучей с энергией фотонов от 100 кэВ до 1 МэВ, то недавно в [1] было показано, что показатель преломления для гамма-лучей с энергией около 1 МэВ больше единицы, что не соответствовало сложившимся представлениям. Предполагалось, что это открытие станет основой для создания нового вида гамма-оптики. Однако позже указанные авторы признали возможные ошибки в своей работе и сошлись во мнении, что показатель преломления для гамма-излучения меньше единицы, что является общепринятым. Следовательно, коллиматор, по-видимому, является единственным средством контроля гамма-излучения. Поскольку коллиматор характеризуется низкой светосилой, то разработка принципов и устройств для управления пучками гамма-излучения высоких энергий представляется многообещающей и актуальной.

В данной работе предлагается использовать многослойные структуры и поликапиллярные стеклянные структуры в качестве источников вторичного гамма-излучения для увеличения интенсивности гамма-излучения на объекте.

Идея состоит в том, что пропускать первичный пучок гамма-излучения от рентгеновской трубки или ускорителя электронов, через слоистую структуру: пучок будет испытывать рассеяние на электронной подсистеме структуры за счет эффекта Комптона, при этом часть пучка вторичного излучения в направлении каналов структуры образует дополнительный гамма-луч, который увеличит интенсивность излучения в заданном направлении.

На рисунке 1 показана структура, состоящая из плоских слоев материала с атомным номером Z (обозначен как 4), расположенных на расстоянии b друг от друга. Толщина отдельного слоя 4 равна a . Гамма-лучи из рентгеновской трубки или ускорителя пересекают слои структуры под углом φ и рассеиваются на электронной подсистеме атомов слоя 4. Лучи, рассеянные под углом θ , попадают в каналы структуры и образуют направленный пучок гамма-лучей, где θ – угол между рассеянным фотоном и первичным пучком.

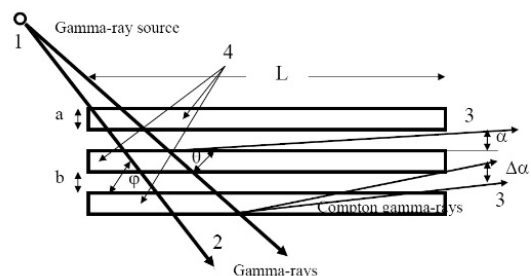


Рисунок 1 – Слоистая структура для генерации гамма-излучения

Интенсивность вторичного комптоновского гамма-пучка зависит от пропускания структуры в направлении угла α , где α – угол между рассеян-