

07.2;07.3;15

Экспресс-диагностика светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом

© М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)
E-mail: maxim.bmw.spb@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 декабря 2012 г.

Разработана методика экспресс-диагностики светодиодных гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами. Создана автоматизированная установка, позволяющая на основе фотоэлектрических измерений при комнатной температуре проводить анализ относительного расположения квантовых ям в гетероструктуре, качества гетероинтерфейсов и степени локализации носителей заряда в ямах. Время измерения одной гетероструктуры составляет доли секунды. Разработанная методика имеет ряд преимуществ по сравнению с широко используемым методом вольт-фарадного профилирования структур с квантовыми ямами.

В настоящее время светодиоды на основе гетероструктур InGaN/GaN активно внедряются в качестве базовых элементов систем освещения. Этому во многом поспособствовали как успехи в теоретическом описании гетероструктур с множественными квантовыми ямами [1], так и технологические достижения в создании подобных систем. Однако существует ряд препятствий для значительного увеличения яркости светодиодов. Среди них стоит выделить падение эффективности с ростом плотности инжекционного тока, а также неоднородность свойств по глубине структуры, которая затрудняет повышение интенсивности излучаемого света посредством увеличения количества квантовых ям в ее активной области. В связи с этим большое внимание в последнее время уделяется разработке методов диагностики светодиодных структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами. В этом направлении свою эффективность доказали адмиттансные методики [2–4], а также оптические методы [5,6] и их модификации. Однако применение

таких методов, как правило, требует специфического оборудования и занимает относительно большое время. В данной работе предлагается новый фотоэлектрический метод анализа гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, который может быть использован для экспресс-диагностики светодиодов на их основе.

В основе предлагаемого метода лежит исследование зависимости фототока от обратного напряжения, прикладываемого к $p-n$ -переходу, содержащему множественные квантовые ямы, при возбуждении светом с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны материала квантовых ям, но не превышающей ширину запрещенной зоны широкозонных барьеров. Выбор такой длины волны обеспечивает условия, когда свет поглощается только в области квантовых ям, но не поглощается в области барьеров. При этом генерируемые светом носители заряда посредством теплового выброса или туннельного эффекта могут перейти из квантовой ямы в барьерные области, что позволит им свободно перемещаться по структуре в направлении, перпендикулярном интерфейсу. В установившемся режиме создаваемый этими носителями электрический ток во внешней цепи будет отличным от нуля только в том случае, если потоки электронов и дырок в данном направлении будут различными. Такая ситуация реализуется, когда квантовая яма находится в области объемного заряда $p-n$ -перехода, электрическое поле которого способствует движению электронов в n -область, а дырок — в p -область. Если же квантовая яма находится в области квазинейтральности, то в установившемся режиме потоки генерируемых светом электронов и дырок совпадают, и фототок отсутствует.

Современные светодиоды, излучающие в зеленой, синей и фиолетовой областях спектра, создаются на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, расположенными в n -области $p-n$ -перехода. В отсутствие внешнего напряжения обычно только одна или две квантовые ямы находятся в области объемного заряда $p-n$ -перехода, в то время как остальные расположены в области квазинейтральности. При приложении обратного смещения происходит расширение области объемного заряда $p-n$ -перехода, при этом внутри нее оказывается все большее количество квантовых ям, в результате чего наблюдается ступенчатое увеличение фототока.

Блок-схема установки для экспресс-анализа светодиодов фотоэлектрическим методом представлена на рис. 1. Она состоит из источника оптического возбуждения, в качестве которого используются сменные

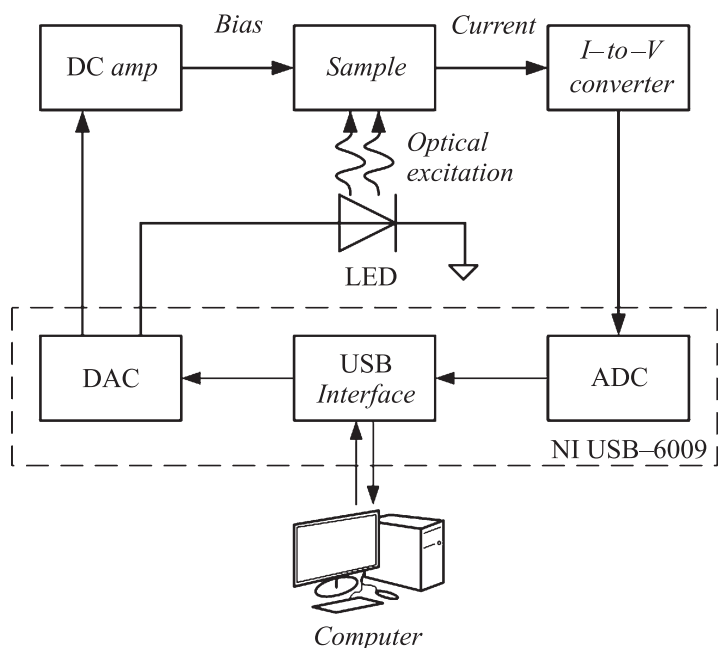


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения фотоэлектрических характеристик структур с квантовыми ямами.

светодиоды (LED), усилителя постоянного тока (*DC amp*), преобразователя тока в напряжение (*I-to-V converter*), аналого-цифрового (ADC) и цифро-аналогового (DAC) преобразователей, функцию которых выполняет интерфейсная плата NI USB-6009. Управление установкой осуществляется через компьютер. Установка работает следующим образом. При подаче управляющих сигналов с компьютера цифро-аналоговый преобразователь формирует два сигнала. Первый подается на усилитель постоянного тока, выходное напряжение которого определяет смещение на образце. Второй сигнал управляет интенсивностью падающего на образец оптического излучения. Ток, протекающий через образец, проходит через преобразователь тока в напряжение, сигнал с которого (пропорциональный протекающему току) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, после чего в оцифрованном виде передается

ся на компьютер. Время измерений составляет доли секунды. Следует отметить, что производительность данной установки ограничена скоростью обмена информацией между компьютером и управляющей схемой, однако принципиально производительность фотоэлектрического метода может быть выше в десятки раз.

Измерения фотоэлектрических характеристик гетероструктур проводились на двух сериях образцов, представляющих синие светодиоды разных производителей. Их структура представляла GaN p - n -переход, в n -области которого расположены пять квантовых ям InGaN шириной около 3 нм. Структуры были выращены на сапфировых подложках методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Предварительные исследования образцов, проводимые методом вольт-фарадного профилирования на установке для измерения адмиттанса [7], указали на следующие особенности. Для образцов первой серии наблюдалась высокая степень локализации носителей заряда в области квантовых ям, что говорило о высоком качестве гетероструктур. Для образцов второй серии степень локализации носителей заряда была существенно ниже, что указывало на несовершенство данных гетероструктур. Целью проводимых измерений было выявление возможности определения качества гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом. Измерялись зависимости фототока от обратного смещения при постоянном возбуждении светом от синего или фиолетового светодиодов. Результаты измерений сравнивались с данными вольт-фарадного профилирования.

На рис. 2, *a* представлены зависимости фототока I_{ph} от обратного смещения U_r для образцов первой серии, полученные при их возбуждении светом от фиолетового ($\lambda_{\max} \approx 420$ нм, кривая 1) и синего ($\lambda_{\max} \approx 465$ нм, кривая 2) светодиодов. Как видно, на вольт-амперных характеристиках этих образцов присутствуют ярко выраженные участки резкого нарастания фототока. Они соответствуют напряжениям, при которых граница области объемного заряда p - n -перехода пересекает квантовые ямы. Так, кривая 1 явно отражает описанное выше ступенчатое увеличение фототока. Наблюдаемые четыре ступени представляют отклики от четырех квантовых ям. Наличие отклика от пятой ямы, содержащейся в структуре, следует ожидать в области прямых напряжений, где обнаружение фототока становится проблематичным. На кривой 2 имеют место участки не только роста, но и спада фототока, что соответствует наличию областей с отрицательной дифференциальной

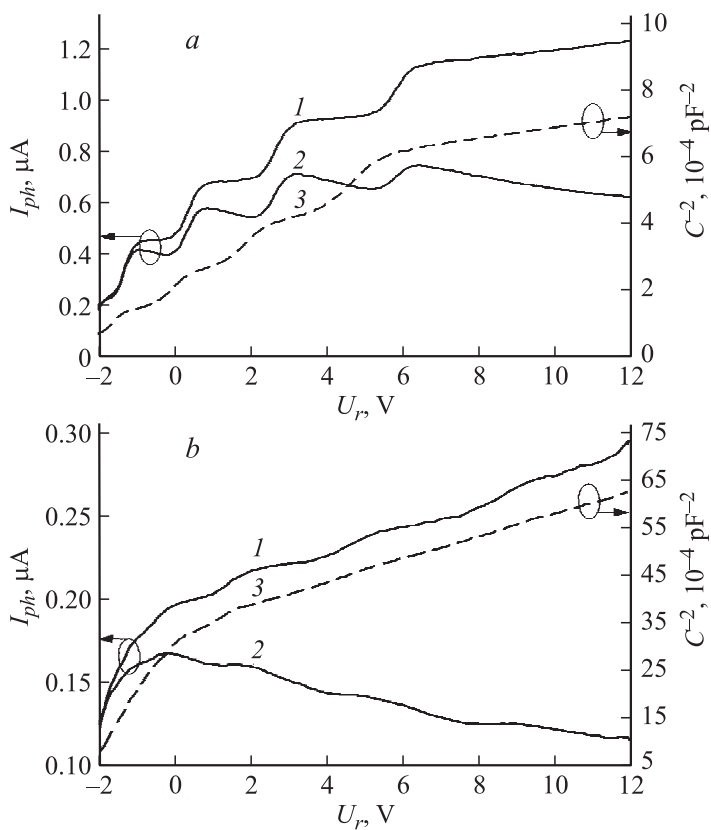


Рис. 2. Зависимость фототока структур InGaN/GaN с 5 квантовыми ямами от обратного смещения (сплошные линии: 1 — $\lambda_{\max} \approx 420$ nm, 2 — $\lambda_{\max} \approx 465$ nm) и их вольт-фарадные характеристики (пунктирные линии 3). *a* — образцы первой серии, *b* — образцы второй серии.

проводимостью. Ключевым условием для возникновения этого эффекта являлось то, что спектр возбуждения в данном случае соответствовал краю оптического поглощения в квантовых ямах. Как указывалось в работе [8], этот эффект может быть связан со смещением края поглощения квантовых ям в коротковолновую область спектра при частичной компенсации пьезоэлектрического поля внутри ямы полем p - n -перехода.

Расстояние между квантовыми ямами можно приближенно оценить, пользуясь известным соотношением между шириной области объемного заряда p - n -перехода и приложенным напряжением [2]. Полагая концентрацию примеси в n -области порядка 10^{18} см^{-3} , определим, что расстояние между квантовыми ямами в данных структурах составляет приблизительно 14 nm. В целом резкий характер изменения фототока с изменением смещения говорит о высоком качестве гетерограниц в исследуемых структурах, на что указывали и результаты их вольт-фарадного профилирования. Пунктирной линией 3 на рис 2, *a* представлена зависимость барьерной емкости C^{-2} от внешнего обратного смещения U_r . Наличие пологих участков говорит о высокой степени локализации носителей заряда в квантовых ямах, т.е. о высоком качестве гетероструктуры.

На рис. 2, *b* приведены зависимости фототока от обратного смещения, измеренные на второй серии образцов. Наблюдаются отклики от четырех квантовых ям, расстояние между которыми составляет приблизительно 18 nm. По сравнению с характеристиками образцов первой серии (рис. 2, *a*) наблюдаемые особенности в фототоке выражены менее отчетливо, что говорит о низком качестве гетероструктуры. Эти результаты согласуются с измерениями вольт-фарадных характеристик этих образцов (пунктирная линия 3 на рис. 2, *b*), где соответствующие особенности также слабо выражены. Полученные данные указывают на слабую локализацию носителей заряда в квантовых ямах, т.е. низкое качество интерфейсов в данных структурах. Наблюдаемое уменьшение высоты ступеней на вольт-амперных характеристиках этих образцов при увеличении обратного смещения указывает на ухудшение качества квантовых ям по мере увеличения их глубины залегания относительно металлургической границы p - n -перехода.

Отметим, что наблюдаемые особенности фототока для обеих серий образцов выражены более отчетливо, чем соответствующие особенности на их вольт-фарадных характеристиках. Это указывает на более высокую чувствительность предлагаемого фотоэлектрического метода по сравнению с методом вольт-фарадного профилирования.

Таким образом, представленный метод может быть использован для диагностики гетероструктур с множественными квантовыми ямами. Этот метод позволяет определять такие параметры, как количество квантовых ям в структуре, относительное расстояние между ними, оценивать качество гетерограниц, а также неоднородность электрофизи-

ческих свойств по глубине структуры. Отметим несколько преимуществ такого метода по сравнению с методом адмиттансных измерений. Во-первых, для реализации предлагаемого метода требуется относительно простое оборудование [9]: источник напряжения, измеритель тока и источник оптического возбуждения, в качестве которого может быть использован светодиод или лазер. Во-вторых, измерение характеристики одного образца может быть осуществлено за доли секунды. Это достигается за счет того, что измеряется мгновенное значение фототока, а не производится фазочувствительное детектирование переменного сигнала с последующим его накоплением, необходимые для емкостных измерений. В-третьих, как отмечалось в работе [8], наблюдаемые особенности, связанные с наличием в структуре квантовых ям, наиболее ярко выражены при высоких (комнатных) температурах, поэтому для измерений не требуется производить охлаждение образцов в криостате. Наконец, данный метод, в отличие от адмиттансных измерений, чувствителен даже к тем квантово-размерным объектам, в которых в исходном состоянии по тем или иным причинам отсутствуют носители заряда.

Список литературы

- [1] Глинский Г.Ф. Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния. СПб.: Технолит, 2008. С. 270–294.
- [2] Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: Элмор, 2007.
- [3] Кучерова О.В., Зубков В.И., Соломонов А.В., Давыдов Д.В. // ФТП. 2010. Т. 44. В. 3. С. 352–357.
- [4] Зубков В.И., Яковлев И.Н., Кучерова О.В., Орлова Т.А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2011. Т. 75. № 10. С. 1491–1497.
- [5] Пихтин А.Н., Комков О.С., Базаров К.В. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 5. С. 608–613.
- [6] Pikhitin A.N., Komkov O.S., Bugge F. // Phys. stat. sol. A. 2005. V. 202. N 7. P. 1270–1274.
- [7] Барановский М.В., Глинский Г.Ф. // Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2012. № 4/2012. С. 3–7.
- [8] Барановский М.В., Глинский Г.Ф., Миронова М.С. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 1. С. 60–64.
- [9] Барановский М.В., Глинский Г.Ф. Пат. 117714 РФ, МПК H01L21/66, приоритет 09.12.2011.