

Частотные и температурные зависимости вольт-фарадных характеристик светоизлучающих структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами

© О.А. Солтанович⁺, Н.М. Шмидт*, Е.Б. Якимов[†]

⁺ Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 июня 2010 г. Принята к печати 1 июля 2010 г.)

Проведены исследования частотной зависимости вольт-фарадных характеристик светоизлучающих структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами в диапазоне частот 60 Гц–5 МГц и интервале температура 77–300 К. Показано, что при всех температурах измеренные вольт-фарадные характеристики зависят от частоты. При этом уменьшение частоты тестового сигнала приводит к таким же изменениям в вольт-фарадных характеристиках, что и повышение температуры измерений. Обнаружено, что для каждой температуры в исследованном диапазоне частот достигается предельная низкочастотная вольт-фарадная характеристика. Показано, что низкочастотные вольт-фарадные характеристики, измеренные при разных температурах, с хорошей точностью совпадают. Процесс достижения равновесия зарядов в активной области, вероятнее всего, определяется туннелированием носителей через барьеры.

1. Введение

Метод вольт-фарадных характеристик (ВФХ) является весьма эффективным методом характеризации полупроводниковых структур, в том числе и светоизлучающих структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ) [1-3]. Метод дает возможность получить информацию о количестве заряда, захваченного в квантовых ямах, о расположении квантовых ям внутри области пространственного заряда $p-n$ -перехода, о положении уровней в квантовых ямах, о концентрации легирующей примеси в ямах и барьерах. При исследовании температурной зависимости ВФХ таких структур было показано [4], что эффективные профили распределения носителей заряда (apparent carrier distribution), получаемые при формальной обработке ВФХ, с понижением температуры как бы удаляются от границы $p-n$ -перехода, т.е. положение квантовых ям относительно границы $p-n$ -перехода, полученное таким образом, зависит от температуры измерения. Для корректной интерпретации результатов измерений необходимо выяснить причины наблюдаемого изменения емкости с температурой.

Одной из возможных причин такой зависимости от температуры может быть изменение с температурой скорости релаксации заряда в квантовых ямах. Действительно, хорошо известно [5,6], что в полупроводниковых структурах, содержащих центры с глубокими уровнями, перезарядка этих центров внутри области пространственного заряда (ОПЗ) дает дополнительный вклад в емкость. В результате в кристаллах с высокой концентрацией центров эффективные профили распределения носителей заряда, рассчитанные из результатов низко- и высокочастотных измерений, могут существенно различаться. При этом при низкой частоте тестового

сигнала значения измеряемой емкости увеличиваются по сравнению с измеренными на высокой частоте, а ширина ОПЗ, определенная из измеренной емкости, в общем случае меньше, чем реальная ширина ОПЗ. Такое же поведение должно наблюдаться и в структурах с квантовыми ямами. Поскольку область применимости приближений высокой или низкой частоты определяется скоростью установления равновесного заряда в квантовой яме, ВФХ может изменяться при повышении температуры от высокочастотной (ВЧ) (заряд в квантовых ямах не успевает следовать за тестовым сигналом) к низкочастотной (НЧ) (заряд в квантовых ямах успевает следовать за переменным напряжением тестового сигнала). На практике измерения ВФХ таких структур проводятся, как правило, при комнатной температуре и на относительно высоких частотах (например, 100 кГц, 1 или 2 МГц), однако *a priori* трудно заключить, являются ли характеристики, измеренные в таких условиях, предельными случаями НЧ либо ВЧ ВФХ. При этом систематические экспериментальные исследования, позволяющие уверенно утверждать, при каких условиях измерений для таких структур реализуются варианты НЧ и ВЧ ВФХ, насколько нам известно, отсутствуют. Представляется, что исследования ВФХ в широком диапазоне частот позволят выяснить причины сдвига эффективных профилей концентрации носителей заряда с температурой в структурах с МКЯ и найти адекватные условия характеризации таких структур.

В настоящей работе проведены исследования частотной зависимости ВФХ светоизлучающих структур InGaN/GaN с МКЯ в диапазоне частот 60 Гц–5 МГц при температурах в диапазоне 77–300 К и на их основе рассчитаны эффективные профили концентрации носителей заряда.

[†] E-mail: yakimov@iptm.ru

2. Методика эксперимента

Светоизлучающие структуры на основе InGaN/GaN были выращены методом МОСVD (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) на сапфире с ориентацией (0001). Светоизлучающие структуры состояли из слоя *n*-GaN толщиной 3 мкм, легированного кремнием (концентрация $N_d \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), буферной сверхрешетки GaN/InGaN с низким содержанием In (< 10%), активного слоя, содержащего 5 пар квантовых ям и барьеров (в большинстве исследованных структур слой InGaN толщиной 3 нм и GaN толщиной 12 нм соответственно), а также верхнего слоя *p*⁺-GaN толщиной ~ 0.1 мкм, легированного Mg до концентрации $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Контакты к *p*-GaN, используемые для измерений ВФХ, создавались напылением тонких слоев Ni и Au диаметром 330 мкм с последующим вытравливанием вокруг них мезаструктуры диаметром 430 мкм. Измерения ВФХ проводились в диапазоне частот 60 Гц–5 МГц измерителями импеданса HP/Agilent 4284A и 4285A при тестовом сигнале 35 мВ в диапазоне температур $T = 77\text{--}300$ К.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В светоизлучающих структурах InGaN/GaN с МКЯ концентрация акцепторов в *p*-области обычно на несколько порядков величины превышает концентрацию в *n*-области. Поэтому для расчета эффективного профиля концентрации носителей заряда в *n*-области можно использовать уравнение для барьера Шоттки или несимметричного *p*–*n*-перехода [6]:

$$N(z) = \frac{C(U)^3}{\epsilon\epsilon_0 S^2 e [dC(U)/dU]}, \quad (1)$$

где C — измеряемая емкость, U — приложенное напряжение, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — электрическая постоянная, S — площадь структуры, e — заряд электрона. При этом глубина z обычно принимается равной ширине ОПЗ, рассчитанной как $W = \epsilon\epsilon_0 S / C$. На рис. 1 приведены типичные эффективные профили концентрации в структуре с МКЯ, рассчитанные по формуле (1) из ВФХ, измеренных на частоте 1 МГц при 80 и 300 К. Видно, что пики, соответствующие заполнению квантовых ям, при охлаждении существенно смещаются по глубине, что соответствует уменьшению емкости при понижении температуры. В принципе такое уменьшение емкости можно было бы объяснить в рамках предположения о том, что ширина ОПЗ в *p*-области увеличивается при охлаждении и эта область начинает давать заметный вклад в измеряемую емкость.

Еще одна возможная причина такого изменения может быть связана с тем, что в структурах, содержащих центры с глубокими уровнями, граница между

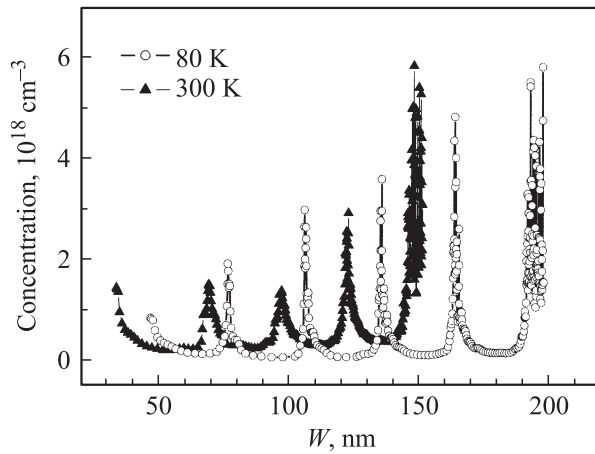


Рис. 1. Смещение эффективного профиля распределения носителей заряда при низких температурах для гетероструктуры InGaN/GaN с 5 квантовыми ямами.

заполненными и незаполненными состояниями смещена относительно границы ОПЗ на величину λ -слоя [7]

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(E_F - E_t)}{e^2 N_d}}, \quad (2)$$

где E_F — положение уровня Ферми, N_d — концентрация доноров, а E_t в случае квантовых ям — положение основного уровня в квантовой яме. Поэтому при изменении величины λ с температурой (например, из-за изменения положения уровня Ферми) „кажущееся“ положение квантовой ямы по глубине также должно смещаться.

Наконец, для структур с высокой концентрацией центров с глубокими уровнями, которые по свойствам похожи на структуры с квантовыми ямами, известно [6], что ширина ОПЗ корректно рассчитывается только из ВЧ емкости, т.е. при частотах тестового сигнала, при которых заряд на ловушках не успевает откликаться на тестовый сигнал. При низких частотах выражение (1) в общем случае может давать некорректные значения глубины и концентрации носителей при расчете профилей в таких структурах и, таким образом, его использование также может приводить к кажущемуся смещению получаемых профилей по глубине. Следует отметить, что именно поэтому профили концентрации, рассчитанные по формуле (1), обычно называют эффективными.

На рис. 2 представлены ВФХ, измеренные при 80 и 300 К, и зависимости производных dC/dU от приложенного напряжения для обеих температур. Видно, что пики на производных, соответствующие барьерам между ямами, наблюдаются при близких напряжениях. Если бы наблюдаемое изменение емкости при понижении температуры определялось изменением ширины ОПЗ в *p*-области и (или) изменением ширины λ -слоя, то изменение температуры должно было бы приводить к смещению пиков по шкале напряжений. Это, по-видимому, позволяет утверждать, что оба указанных механизма

не оказывают определяющего влияния на наблюдаемое уменьшение емкости при понижении температуры.

На рис. 3 приведены эффективные профили концентрации, полученные из ВФХ, измеренных на разных частотах при 77 и 295 К. Видно, что профили, полученные при одной температуре и разных частотах, смещены

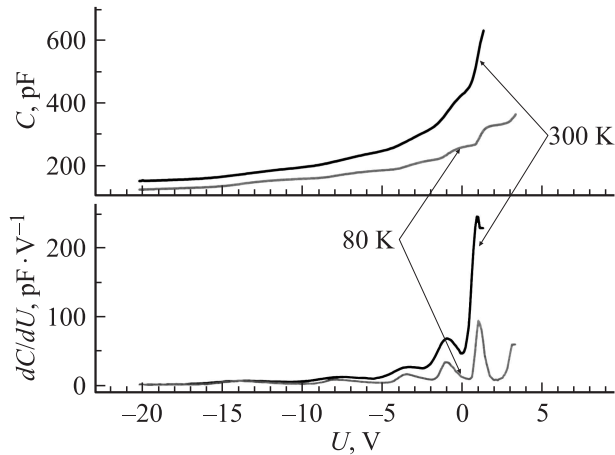


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики и зависимости dC/dU от напряжения для гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN при $T = 80$ и 300 К.

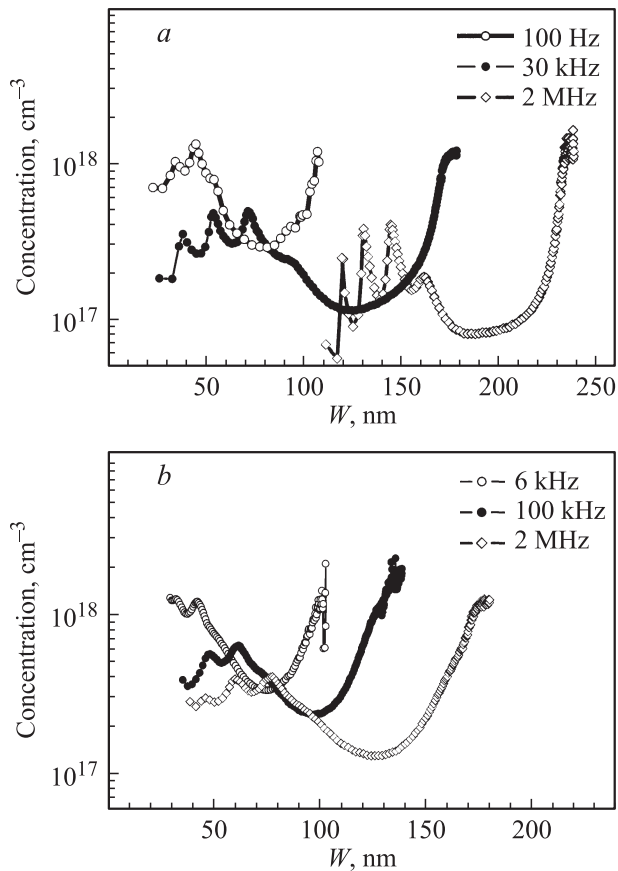


Рис. 3. Частотные зависимости эффективных профилей распределения носителей заряда, полученных стандартной обработкой ВФХ, в гетероструктуре InGaN/GaN с 5 квантовыми ямами при $T = 77$ (a) и 295 К (b).

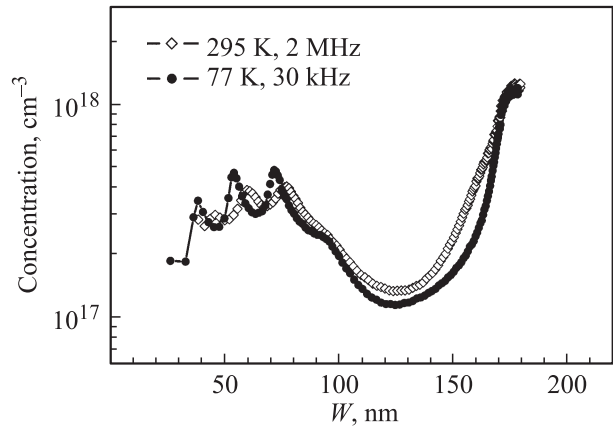


Рис. 4. Сопоставление двух эффективных профилей распределения носителей заряда, полученных из измерений при разных температурах. Частота тестового сигнала выбрана таким образом, чтобы продемонстрировать схожесть профилей по форме. Условия измерений указаны.

друг относительно друга. При этом уменьшение частоты тестового сигнала приводит качественно к таким же изменениям в ВФХ (и соответственно в получаемых эффективных профилях распределения носителей заряда), которые наблюдаются и при повышении температуры измерений. Хорошей демонстрацией и убедительным подтверждением эквивалентности влияния повышения температуры и понижения частоты измерений на ВФХ служит то, что для каждой температуры можно подобрать такую частоту, при которой профили будут практически совпадать (рис. 4).

При низких частотах (ниже 100 Гц при 77 К и ниже 6 кГц при 295 К) эффективные профили стремятся к некому профилю насыщения, в то время как при высоких частотах достичь предельной ВЧ ВФХ в исследованном диапазоне частот и температур не удалось. По-видимому, это связано с невозможностью корректных измерений емкости при частотах выше 5 МГц на имеющемся у нас оборудовании. Таким образом, можно заключить, что обычно измеряемые при комнатной температуре ВФХ действительно не могут быть описаны в рамках ВЧ или НЧ приближений, а являются промежуточными между этими предельными случаями.

При измерении частотных зависимостей ВФХ было установлено, что для каждой температуры в исследованном температурном диапазоне существует предельная НЧ ВФХ (когда с дальнейшим уменьшением частоты форма и положение ВФХ не изменяются). Следует подчеркнуть, что такие предельные НЧ ВФХ, измеренные при разных температурах, с хорошей точностью совпадают (рис. 5). Это служит дополнительным подтверждением того, что возможное влияние на поведение ВФХ изменения ширины ОПЗ в p -области и (или) величины λ -слоя невелико, а сдвиг эффективного профиля с температурой в основном связан с тем, что с понижением температуры скорость установления величины равновесного заряда, захваченного в квантовые ямы,

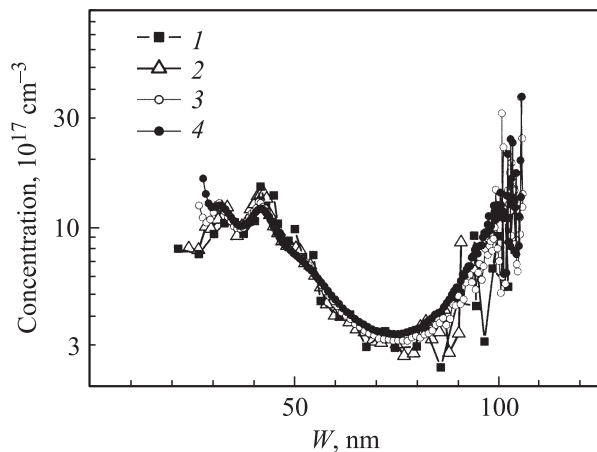


Рис. 5. Эффективные профили распределения носителей заряда в гетероструктуре InGaN/GaN с 5 квантовыми ямами, полученные из предельных низкочастотных ВФХ при разных температурах. Экспериментально установленные значения частот, при которых реализуются условия низкочастотных ВФХ: 1 — 60 Гц при 77 К; 2 — 100 Гц при 120 К; 3 — 1 кГц при 220 К; 4 — 6 кГц при 295 К.

понижается и при данной частоте измерений ВФХ все более приближается к условиям реализации ВЧ предела.

Следует отметить, что возможность достижения низкочастотного предела позволяет проводить адекватное моделирование полученных кривых. Действительно, хотя из емкости, измеренной при низкой частоте, нельзя корректно определить ширину ОПЗ, такая емкость соответствует случаю, когда заряд в квантовых ямах успевает откликаться на сигнал переменного напряжения, что обычно неявно предполагается при моделировании ВФХ таких структур.

Проведенные измерения позволяют также оценить скорость достижения равновесия заряда в квантовых ямах, которая для исследованных структур изменяется от $\sim 10^3 \text{ c}^{-1}$ при 77 К до $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ при 295 К. Такая слабая зависимость от температуры, по-видимому, свидетельствует о том, что этот процесс определяется туннелированием через барьеры между квантовыми ямами. Это предположение и полученные результаты хорошо коррелируют с результатами исследования вольт-амперных характеристик [8], свидетельствующих о туннельном характере безызлучательной рекомбинации при малых смещениях.

4. Заключение

Таким образом, в работе исследована зависимость ВФХ светоизлучающих структур InGaN/GaN с МКЯ от тестовой частоты в диапазоне температур 77–300 К. Показано, что в большинстве случаев измеряемые ВФХ являются промежуточными между таковыми в ВЧ и НЧ приближениях. В то же время при всех исследованных температурах удалось получить предельную НЧ ВФХ, которая оказалась практически одинаковой для

всех температурных точек. Это открывает интересные возможности для корректной характеристики реальных светоизлучающих структур на основе InGaN/GaN с помощью моделирования НЧ ВФХ.

Работа частично поддержана программой фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] F. Manyakhin, A. Kovalev, A.E. Yunovich. MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., **3**, 53 (1998).
- [2] A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, J. Kim, B. Luo, R. Mehandru, F. Ren, K.P. Lee, S.J. Pearton, A.V. Osinsky, P.E. Norris. J. Appl. Phys., **91**, 5203 (2002).
- [3] F. Rossi, M. Pavesi, M. Meneghini, M. Manfredi, G. Meneghesso, A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, U. Strass, U. Zehnder, E. Zanoni. J. Appl. Phys., **99**, 053 104 (2006).
- [4] О.А. Солтанович, Н.М. Шмидт, Е.Б. Якимов. Тез. докл. 6-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“ (СПб., 2008) с. 204.
- [5] L.C. Kimerling. J. Appl. Phys., **45**, 1839 (1974).
- [6] P. Blood, J.W. Orton. *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States* (London–San Diego–N.Y., Academic Press, 1992) chap. 6.
- [7] D. Stievenard, D. Vuillaume. J. Appl. Phys., **60**, 973 (1986).
- [8] A.E. Chernyakov, M.M. Sobolev, V.V. Ratnikov, N.M. Shmidt, E.B. Yakimov. Superlat. Microstruct., **45**, 301 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

Frequency and temperature dependencies of capacitance–voltage characteristics of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting structures

O.A. Soltanovich⁺, N.M. Shmidt^{*}, E.B. Yakimov⁺

⁺ Institute of Microelectronics Technology, Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia
^{*} Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A frequency dependence of capacitance–voltage ($C-V$) characteristics in multiple quantum well InGaN/GaN heterostructures in the range of 60 Hz–5 MHz is investigated at temperatures from 77 to 300 K. It is found that temperature lowering and test frequency increase lead to the similar changes in obtained apparent carrier distributions. It is shown that commonly used conditions for capacitance–voltage profiling of InGaN/GaN LEDs correspond to an intermediate case between low- and high-frequency capacitance approximations. At all temperatures investigated, the edge low-frequency capacitance–voltage profiles are experimentally reached and found to be identical.