

06

## Прямое наблюдение утечек неосновных носителей заряда в действующем лазерном диоде методом сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии

© К.С. Ладутенко, А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: fisik2000@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 февраля 2009 г.

Предлагается подход к изучению процессов утечки дырок и электронов из активной области полупроводниковых лазерных диодов, заключающийся в измерениях с помощью сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии на поверхности лазерных зеркал усредненного сигнала вариаций локальной контактной разности потенциалов, возникающих в действующем приборе при импульсном питании. Показано, что уровень измеряемого сигнала определяется степенью перезарядки медленных поверхностных состояний, взаимодействующих с неравновесными носителями заряда, концентрация которых прямо связана с током утечки.

PACS: 42.55.Px, 42.60.By, 68.37.Ps, 63.25.+i

Метод сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии (СКЗМ) [1] позволяет получать сведения о локальном распределении электрического поля в полупроводниковых приборах в рабочих условиях [2–5]. Ранее на примере исследования лазерных диодов [6,7] было показано, что в структурах с  $p-n$ -переходом при протекании постоянного инжекционного тока величина измеряемой в СКЗМ контактной разности потенциалов (CPD — contact potential difference) может изменяться из-за захвата инжектированных неосновных носителей заряда на поверхностные состояния скола исследуемой гетероструктуры ( $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$ ). В нашей работе приборы с  $p-n$ -переходом изучались при импульсном питании. Использование импульсного питания с большой скважностью позволило подавить (снизить до уровня шумов) проявление изменений

объемного потенциала в Кельвин-измерениях и провести прямые наблюдения утечки неосновных дырок и электронов в лазерных диодах.

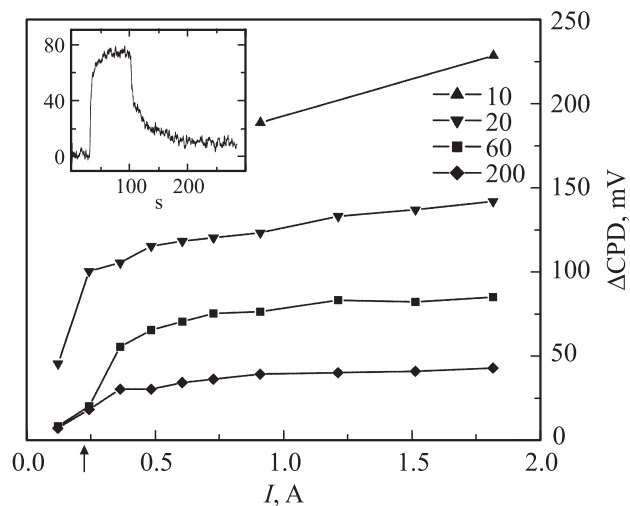
Измерения распределений значений CPD на поверхности зеркала лазерного диода в воздушной среде велись в двухпроходном режиме СКЗМ [8] атомно-силового микроскопа фирмы NT-MDT [9]. В первом проходе регистрируется топографический профиль изучаемой поверхности при поддержании постоянной амплитуды механических колебаний зонда. Во втором проходе механическое возбуждение отключается, зонд поднимается на фиксированную высоту (так называемый лифт), перемещается вдоль траектории первого прохода и измеряется сигнал CPD. При измерениях использовались кремниевые кантилеверы NSG11, типичная высота лифта во втором проходе составляла 40 nm, частота развертки быстрого сканирования менее 1 Hz.

В качестве образцов были выбраны инжекционные полупроводниковые лазерные диоды полосковой конструкции (ширина полоска 100  $\mu\text{m}$ ) на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs двойных гетероструктур раздельного ограничения. Лазерная гетероструктура состояла из  $n^+$ Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As эмиттера толщиной 1  $\mu\text{m}$ , нелегированного варизонного (Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As–Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As) волновода толщиной 0.8  $\mu\text{m}$  с напряженной InGaAs квантовой ямой (70 Å) в центре,  $p^+$  Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As эмиттера толщиной 1  $\mu\text{m}$  и  $p^+$  GaAs контактного слоя. На зеркалах лазера отсутствовали просветляющие диэлектрические покрытия, понижающие латеральное разрешение СКЗМ. Для питания лазера во всех экспериментах использовалась схема с заземленной  $n$ -подложкой. Источник питания обеспечивал постоянное обратное, а также постоянное и импульсное прямое смещения. Типичная длительность импульсов составляла около 200 ns, а период их повторения 40  $\mu\text{s}$ . Одно СКЗМ измерение требует несколько миллисекунд, и при импульсном питании это приводит к усреднению детектируемых значений CPD. Профили изменения контактной разности потенциалов ( $\Delta\text{CPD}$ ) были получены вычитанием профиля CPD заземленного и короткозамкнутого образца из профиля CPD образца, к которому приложено смещение.

Идея прямого наблюдения токов утечки основана на регистрации сигнала  $\Delta\text{CPD}_{leakage}$ , отражающего изменения локального приповерхностного изгиба зон при захвате на поверхностные состояния инжектированных неосновных носителей заряда. При постоянном смещении заметный вклад в сигнал дает распределение приложенного смещения (BVD — bulk voltage drop). При импульсном питании вклад BVD

уменьшается обратно пропорционально скважности импульсного питания. Для типичных значений скважности  $\sim 200$  и величины смещения диода  $\sim 2V$  максимальная величина вклада BVD в измеряемый сигнал вблизи  $p$ -контакта не должна превышать  $10\text{ mV}$ , что приблизительно соответствует уровню шума измерений. При импульсной инжекции неосновных носителей среднее значение изменения локального приповерхностного изгиба зон в полупроводнике зависит от осуществления захвата носителей на поверхностные состояния. Если захвата нет (так называемый режим постоянного поверхностного заряда [10]), то, как и при усреднении вклада BVD, среднее значение будет близко к нулю. Таким образом, в рассматриваемой ситуации большой сигнал  $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$  должен быть свидетельством процесса медленной перезарядки поверхностных состояний с большим временем жизни в неравновесном состоянии.

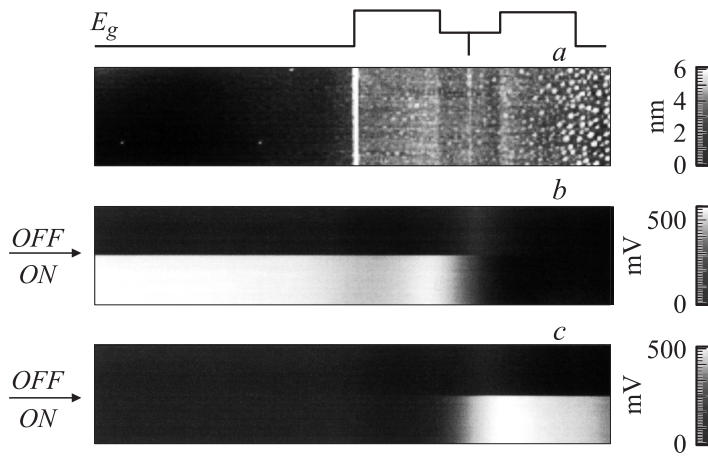
На рис. 1 для четырех скважностей импульсного питания лазерного диода отложены значения  $\Delta\text{CPD}$ , зарегистрированные над поверхностью скола заземленной  $n$ -подложки лазера в  $5\text{ }\mu\text{m}$  от активной области, в зависимости от тока накачки. Для всех значений токов и скважностей наблюдается положительный сигнал, отражающий уменьшение отрицательного заряда на поверхностных состояниях  $n$ -подложки. Можно выделить еще одну характерную черту: при больших токах (больше порогового значения) сигнал  $\Delta\text{CPD}$  почти не меняется, что, возможно, связано со стабилизацией концентрации носителей заряда в активной области лазера после достижения лазерной генерации [11]. Слабый рост сигнала в области токов больше  $1\text{ A}$  (особенно заметный при малой скважности 10 и 20) можно объяснить как температурными изменениями поверхностного потенциала, так и увеличением утечки дырок из активной области, вызванным разогревом лазерного диода. Для разделения этих двух механизмов запланированы дополнительные эксперименты. Более важным представляется, что в достаточно широком диапазоне значений импульсного тока (от  $\sim 2$  до  $\sim 7$  значений порогового тока, от  $0.5$  до  $1.8\text{ A}$ ) при последовательном уменьшении скважности приблизительно в 3 раза (скважности 200, 60 и 20) величина  $\Delta\text{CPD}$  растет приблизительно на  $40\text{--}50\text{ mV}$ . Мы полагаем, что этот факт отражает логарифмическую связь амплитуды изменения приповерхностного изгиба зон со средней по времени приповерхностной концентрацией неосновных неравновесных дырок и, следовательно, логарифмическую зависимость сигнала от скважности [6,7]. На вставке



**Рис. 1.** Зависимости  $\Delta CPD$  от тока инжекции на поверхности скола лазерного диода при импульсном питании, измеренные при разной скважности импульсов. На вставке показана кинетика сигнала  $\Delta CPD$ , измеренная над заземленной  $n^+$ -подложкой, при подаче и выключении импульсного питания со скважностью 200 и значениях импульсного тока 1.8 А. Стрелка на рисунке указывает пороговое значение тока лазерной генерации. Использована стандартная оптическая система регистрации отклонений кантилевера на длине волны 650 nm.

рис. 1 показана характерная кинетика сигнала  $\Delta CPD$ . При включенном импульсном питании сигнал плавно вырастает до уровня +80 mV, что соответствует захвату на поверхностные состояния неосновных дырок. При выключении импульсов сигнал возвращается к нулевому равновесному значению более чем за 200 s. Анализ данных рис. 1 позволяет сделать следующий вывод: импульсы инжекционного тока выбрасывают из активной области дырки, которые захватываются на поверхностные состояния и создают неравновесный долгоживущий положительный заряд со временем жизни, существенно превышающим длительность импульсов питания, период их повторения и время СКЗМ измерений.

Как и дырки, неосновные электроны, выброшенные из активной области в  $p$ -слои лазерного диода, будут уменьшать величину припо-



**Рис. 2.** СКЗМ исследование распределений приложенных прямых импульсного (скважность 200, амплитуда импульсного тока 560 мА) и постоянного (+0.5 V) смещений на зеркале лазерного диода. 2D топография рельефа, измеренная в области выхода основных слоев лазера (a). 2D изображения сигнала CPD, использованные для определения профиля  $\Delta\text{CPD}$  в прямо смещенном лазерном диоде, при включении импульсного (b) и постоянного питания (c), стрелки слева указывают на место скана, где было включено питание. На рисунке (d) указаны: профиль топографии (A), усредненные профили распределения изменения контактной разности потенциалов при приложении импульсного (B) и постоянного (C) смещения. Для идентификации основных слоев лазера в верхней части рисунка также приведено схематическое изображение зонной диаграммы лазерной гетероструктуры. Для повышения чувствительности СКЗМ в измерениях  $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$  использована инфракрасная система регистрации отклонений кантилвера на длине волны  $1.3\ \mu\text{m}$ .

верхностного изгиба зон, заряжая при этом поверхность отрицательно. На рис. 2 показаны результаты СКЗМ исследования распределений приложенных прямых импульсных и постоянных смещений на зеркале лазерного диода. Рассмотрим на рис. 2, d профили распределений  $\Delta\text{CPD}$ , измеренные над зеркалом прямо смещенного лазерного диода при приложении постоянного смещения (C) и импульсного со скважностью 200 (B). Профиль  $\Delta\text{CPD}$  лазерного диода при постоянном смещении (C) отражает распределение объемного потенциала (главные изменения

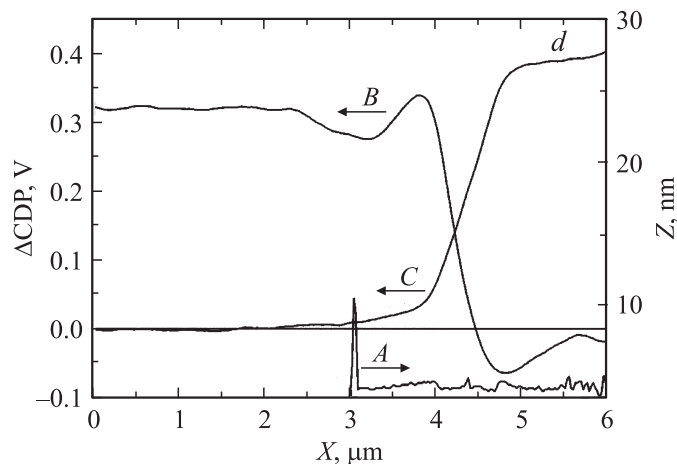


Рис. 2 (продолжение).

происходят в области нелегированного волновода) и подробно описан в статьях [2,3,5–7]. Профиль  $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$  ( $B$ ) при импульсном питании также имеет ступенчатую форму, но принципиально отличается от профиля ( $C$ ): в  $n$ -области значения  $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$  положительны, а в  $p$ -эмиттере отрицательны. Такое поведение хорошо соответствует изложенным выше представлениям о захвате на поверхность инжектируемых неосновных электронов и дырок.

Интересно проанализировать детали профиля  $\Delta\text{CPD}_{\text{leakage}}$ . Существенная разница в амплитудах сигнала в  $n$ - и в  $p$ -областях может быть вызвана различием в высоте потенциальных барьеров, определяющих токи утечки электронов и дырок из активной области (обычно для GaAlAs лазерных структур барьер для электронов примерно в два раза выше барьера для дырок [12]). Представляется важным также учитывать влияние на измеряемый сигнал следующих факторов, характеризующих разные слои лазерного диода: скорость рекомбинации неосновных носителей заряда, их равновесная концентрация у поверхности, кинетика перезарядки поверхностных состояний [13,14].

В работе предложен новый подход к изучению процессов утечки дырок и электронов из активной области полупроводниковых лазерных диодов, заключающийся в измерениях на поверхности лазерных зеркал

локальных изменений контактной разности потенциалов, возникающих при включении импульсного питания диода. Отсутствие необходимости специальной подготовки образцов и простота реализации этого подхода создают, на наш взгляд, основу для разработки экспресс-метода оценки качества и анализа причин отказов инжекционных полупроводниковых приборов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 06-02-17198-а и 06-02-17318-а) и программой президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

## Список литературы

- [1] *Nonemacher M., O'Boyle M.P., Wickmarming H.K.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 2921.
- [2] *Kuntze S.B., Ban D., Sargent E.H., Dixon-Warren St.J., White J.K., Hinzer K.* // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2005. V. 30. P. 71.
- [3] *L'èveque G., Girard P., Skouri E., Yarekha D.* // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 157. P. 251.
- [4] *Ballif C., Moutinho H.R., Al-Jassim M.M.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 1448.
- [5] *Ankudinov A.V., Evtikhiev V.P., Kotelnikov E.Yu., Titkov A.N., Laiho R.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. P. 432.
- [6] *Анкудинов А.В., Евтихийев В.П., Ладутенко К.С., Тутков А.Н., Laiho R.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 8. С. 1009.
- [7] *Ankudinov A.V., Evtikhiev V.P., Ladutenko K.S., Rastegaeva M.G., Titkov A.N., Laiho R.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 024 504.
- [8] *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004.
- [9] [www.ntmtdt.ru](http://www.ntmtdt.ru)
- [10] *Kronik L., Shapira Y.* // Surf. Sci. Rep. 1999. V. 37. P. 1.
- [11] *Wood S.A., Smowton P.M., Molloy C.H., Blood P., Somerford D.J., Button C.C.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 2540.
- [12] *Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5815.
- [13] *Johnson E.O.* // Phys. Rev. 1958. V. 101. P. 153.
- [14] *Бедный Б.И., Василевский М.И., Карпович И.А.* // ФТП. 1989. Т. 23. С. 362.