

УДК 621.383

Исследование слоев МЛЭ КРТ методом сканирующей лазерной микроскопии

П. Ю. Пак, В. А. Фатеев, В. В. Шашкин

Институт физики полупроводников, г. Новосибирск, Россия

Методом сканирующей лазерной микроскопии (СЛМ) исследовано пространственное распределение электрически активных областей в МЛЭ-слоях HgCdTe (КРТ) составов $x = 0,22$ и $x = 0,3$, а также в массивах планарных фотодиодов на основе КРТ. Обнаружена корреляция между результатами СЛМ-исследования фрагмента массива планарных фотодиодов и их вольт-амперными характеристиками. Исследован характер распределения электрических неоднородностей в объеме эпитаксиальной пленки КРТ с помощью послойного стравливания. Сравнение СЛМ-изображения фрагмента МЛЭ КРТ с профилями пространственного распределения концентрации фоновых примесей (С, Си, As, Li), полученными с помощью методики вторичной ионной масс-спектроскопии (ВИМС), позволяет говорить о корреляции пространственного положения электрических неоднородностей с пространственным распределением фоновых примесей.

Качество многоэлементных ИК-фотоприемников (ФП) существенно зависит от пространственной однородности базового материала. Наличие неоднородностей параметров базового материала (молярного состава твердого раствора, концентрации носителей, плотности дефектов и т. п.) приводит к разбросу характеристик элементов ФП, а также низкому выходу годных элементов матричного ФП. Поэтому пространственно-разрешающие методики измерения параметров базового материала весьма полезны для создания большеформатных ИК-ФП высокого качества.

Работа сканирующего лазерного микроскопа основана на появлении фотоЭДС при локальной засветке пространственно неоднородного слоя полупроводникового материала. Если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, в пятне засветки происходит генерация электронно-дырочных пар. Полагаем, что образец представляет собой тонкую пленку, т. е. рассмотрим плоскую двумерную модель. Неравновесные дырки и электроны будут диффундировать равномерно во все стороны от области засветки. Пусть на расстоянии, меньшем диффузионной длины носителей от области засветки,

существует некая область, характеризующаяся наличием встроенного электрического поля. Тогда электроны и дырки пространственно разделяются. Перераспределение заряда вызывает нарушение радиальной симметрии распределения неравновесных носителей в образце и, соответственно, перераспределение заряда по всему образцу. В общем случае разность потенциалов между двумя произвольными точками на образце будет отлична от нуля. Величина разности потенциалов будет определяться направлением вектора встроенного электрического поля относительно оси, проходящей через точки, в которых производится измерение, и величиной заряда. Если представить разделенные полем электроны и дырки как два разноименных равных по величине заряда, то разность потенциалов между двумя произвольными точками A и B на образце (рис. 1) при условии, что $r_1, r_2 \gg L$, можно представить в виде

$$V_{AB} = \varphi(r_1) - \varphi(r_2) = \frac{Q_{eff} L}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{\cos \Theta_1}{r_1} - \frac{\cos \Theta_2}{r_2} \right),$$

где Q_{eff} — сумма модулей зарядов, разделенных полем электронов и дырок;

L — расстояние между центроидами зарядов пространственно разделенных электронов и дырок;

$\epsilon\epsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость материала.

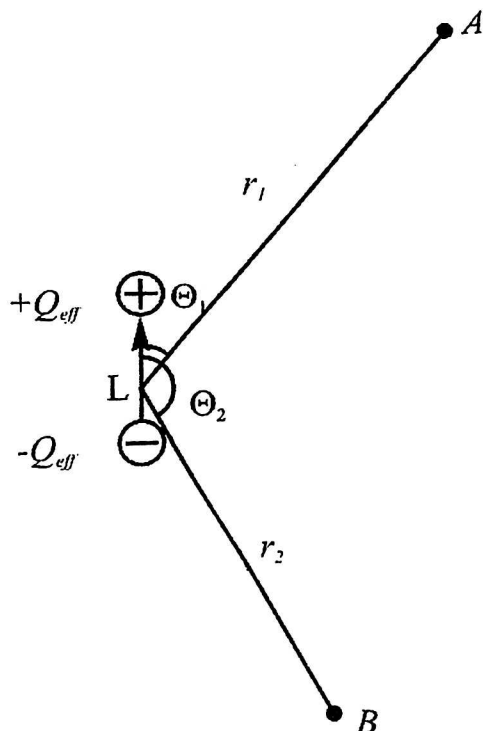


Рис. 1. К расчету СЛМ-сигнала

Этот эффект получил название LBIC (Laser Beam Induced Current — от англ.). Характер поведения сигнала, измеряемого между неподвижными контактами к образцу при движении луча через область, характеризующуюся встроенным электрическим полем, легко понять на примере планарного $p-n$ -перехода.

Возьмем для простоты одномерную модель (рис. 2). Пусть образец представляет собой однородно легированную n -область в однородно легированном материале p -типа. При засветке образца слева от n -области электроны, дошедшие до границы перехода, затаиваются его полем внутри n -области. Дырки встречают на своем пути потенциальный барьер. Пространственно-разделенные заряды вызовут появление разности потенциалов между контактами A и B . По мере приближения к границе перехода количество носителей заряда, дошедших до границы, будет расти и достигнет максимума, когда луч находится на границе $p-n$ -перехода. При засветке точно по центру n -области пространственное распределение электронов и дырок, разделенных левой и правой границами перехода, симметрично, заряды взаимно компенсируют друг друга, и сигнал LBIC равен нулю. По мере приближения к правой границе сигнал начинает расти по модулю, но с противоположным знаком, так как пространственное положение разделенных полем правой границы переходов носителей относительно точек A и B меняется на противоположное.

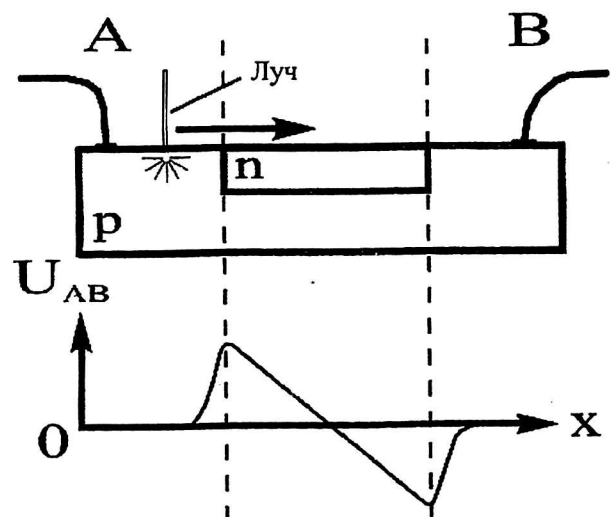


Рис. 2. Профиль СЛМ-сигнала для планарного перехода при сканировании лучом в направлении x

Таким образом, при сканировании лучом через планарный $p-n$ -переход СЛМ регистрирует

* Bajaj J., Tennant W. E., Zucca R. and Irvine S. J. C. // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 872.

двухполярный сигнал, нуль которого совпадает с центром симметрии перехода. Пример с электронно-дырочным переходом демонстрирует принцип работы СЛМ. Исходя из аналогичных рассуждений, можно показать, что методика позволяет регистрировать неоднородности в полупроводнике, дающие встроенное тангенциальное электрическое поле (области с повышенной или пониженной концентрацией основных носителей, вариации состава твердого раствора и т. д.). Кроме того, источнику СЛМ-сигнала могут быть области с пониженным временем жизни неравновесных носителей заряда. В этом случае регистрируемый сигнал является ЭДС Дембера, и СЛМ будет регистрировать неоднородности, обусловленные структурными дефектами фоточувствительных слоев.

Применительно к МЛЭ-слоям КРТ методика состоит в сканировании лазерным пятном по площади образца и регистрации разности потенциалов между контактами, сформированными по краям образца, как функции положения луча. Полученные данные отображаются в виде двумерного изображения с помощью фальшпалитры. В данном представлении СЛМ-изображение прямоугольного $p-n$ -перехода представляет собой двухцветное черно-белое пятно, повторяющее его форму с точностью до диффузи-

онной длины неравновесных носителей заряда в материале — СЛМ-изображение $p-n$ -перехода больше его реального размера на величину порядка диффузионной длины.

В работе исследовались структуры на основе МЛЭ КРТ состава $x = 0,22$ и $x = 0,3$ на подложках из арсенида галлия. СЛМ-изображения получены сканированием световым пятном лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм) диаметром порядка 10 мкм. Мощность излучения < 1 мВт. Шаг сканирования по обеим координатам — 10 мкм.

На рис. 3 представлено СЛМ-изображение фрагмента массива планарных КРТ фотодиодов, полученных имплантацией бора в $p-Hg_{0,7}Cd_{0,3}Te$. Температура образца 293 К. На фоне упорядоченной диодной структуры видны электрические неоднородности, охватывающие группы диодов (см. рис. 3, а, б). Характерный размер неоднородностей — порядка нескольких сотен микрон. Видны также неоднородности в виде более темных и более светлых "пятен" (см. рис. 3, в, г). Размеры и неправильная геометрическая форма данных областей позволяют предположить, что они связаны с неоднородностью параметров исходного материала, на котором сформирована диодная структура.

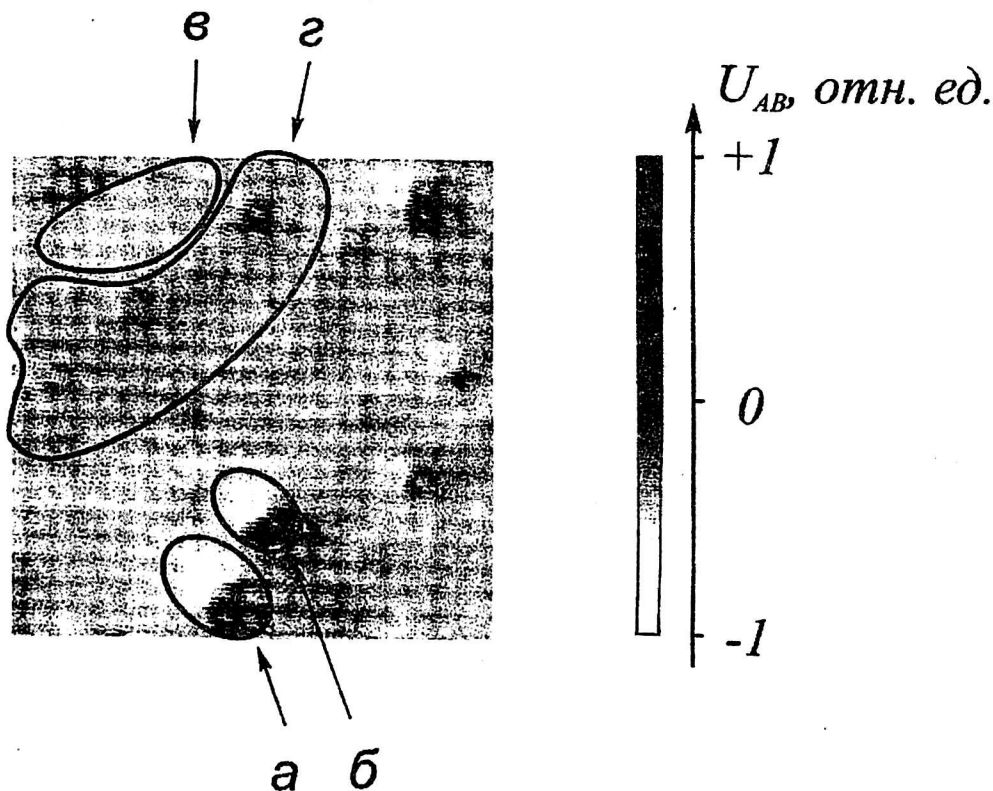


Рис. 3. СЛМ-изображение фрагмента матричной структуры и палитра

На рис. 4, а представлено СЛМ-изображение фрагмента массива планарных КРТ фотодиодов на основе $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$, при этом $p = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; диоды сформированы имплантацией ионов бора; $n = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; глубина 1 мкм. Измерения проводились при температуре 78 К. Вольт-амперные характеристики некоторых диодов, измеренные после формирования омических контактов к n -областям p - n -переходов, представлены на рис. 4, б. СЛМ-изображение показывает наличие неоднородностей, охватывающих по площади сразу несколько диодов. ВАХ диодов, расположенных на этих дефектах, отличаются существенно большими токами при тех же напряжениях смещения (4,5; 5,5; 5,4 В).

Дифференциальное сопротивление этих диодов составляет порядка 10 кОм. В то же время соседние диоды, демонстрирующие ожидаемый профиль СЛМ-сигнала (1,4; 1,3 В), характеризуются гораздо меньшими токами на обратной ветви ВАХ и дифференциальным сопротивлением порядка 1 МОм. Что касается природы этих неоднородностей, влияющих на параметры фотодиодов, можно сделать несколько предположений. Возможно, неоднородности представляют собой области n -типа, существовавшие уже в исходном p -КРТ. Тогда измеряемый ток будет определяться электронно-дырочным переходом, площадь которого существенно больше, чем у "нормального" диода. Нельзя также исключать наличие в этой области центров рекомбинации, связанных со структурными дефектами материала. В любом случае дефекты, регистрируемые СЛМ, оказывают влияние на параметры фотодиодов, ухудшая однородность элементов матричного ФП.

Неоднородности, регистрируемые СЛМ, могут быть связаны со встроенным зарядом вблизи поверхности кристалла. Для проверки этого предположения были проведены послойное травление эпитаксиального слоя КРТ и промежуточные измерения с помощью СЛМ с привязкой по координатам к реперным точкам. СЛМ-изображения фрагмента образца p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ толщиной 12,7 мкм при различных толщинах эпитаксиальной пленки показаны на рис. 5. На рис. 5, а показано СЛМ-изображение (скан) нетравленной поверхности образца. Видно, что существует ряд электрических неоднородностей. После травливания 2,5 мкм было произведено повторное сканирование той же области образца. Серия проводилась до тех пор, пока толщина образца не достигла 4,7 мкм (см. рис. 5, г). Анализ СЛМ-изображений между послойным травлением образца показывает, что положение и размеры электрических неоднородностей в сканируемой области остаются примерно постоянными по глубине образца, что говорит об объемном характере дефектов. Пространственно-разрешающие СЛМ-исследования КРТ, как показано выше, дают информацию о наличии электрических неоднородностей в материале, их пространственном положении и форме. Пространственная неоднородность электрических параметров эпитаксиальных пленок КРТ может быть связана с неоднородностью концентрации основных носителей, неоднородностью мольного состава твердого раствора, а также со скоплением структурных и точечных дефектов.

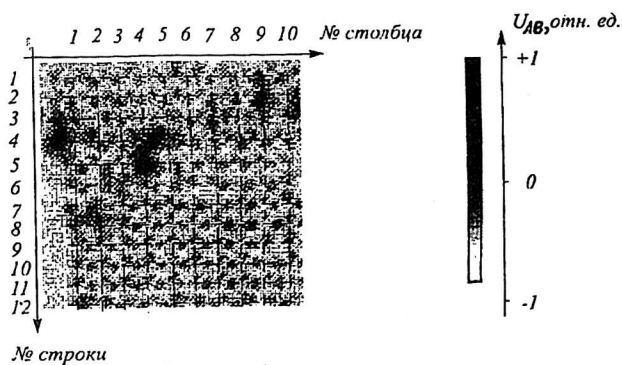
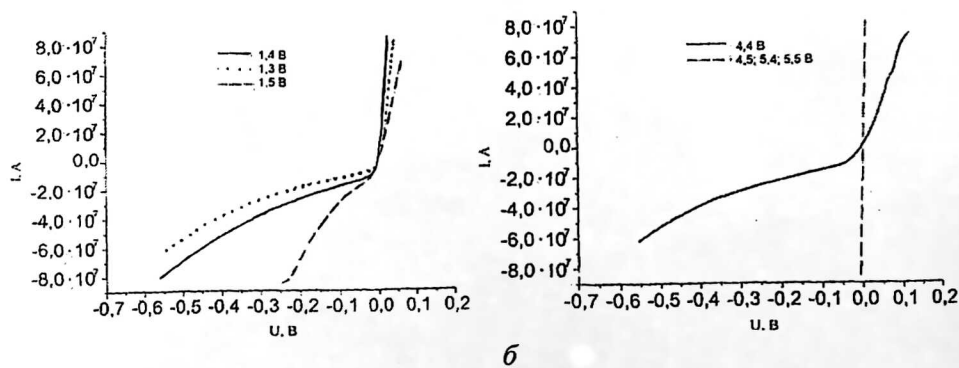


Рис. 4. СЛМ-изображение фрагмента матрицы планарных фотодиодов и палитра (а) и ВАХ некоторых фотодиодов (б).

В подписях к кривым ВАХ в скобках первая цифра — номер строки, вторая — номер столбца, в которых расположен исследуемый диод. Размеры изображения $600 \times 600 \text{ мкм}^2$



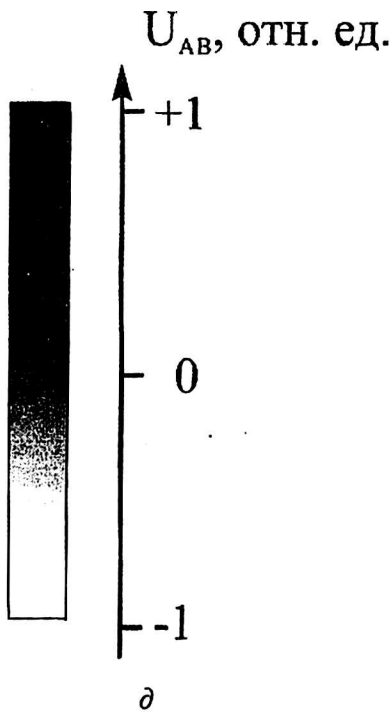
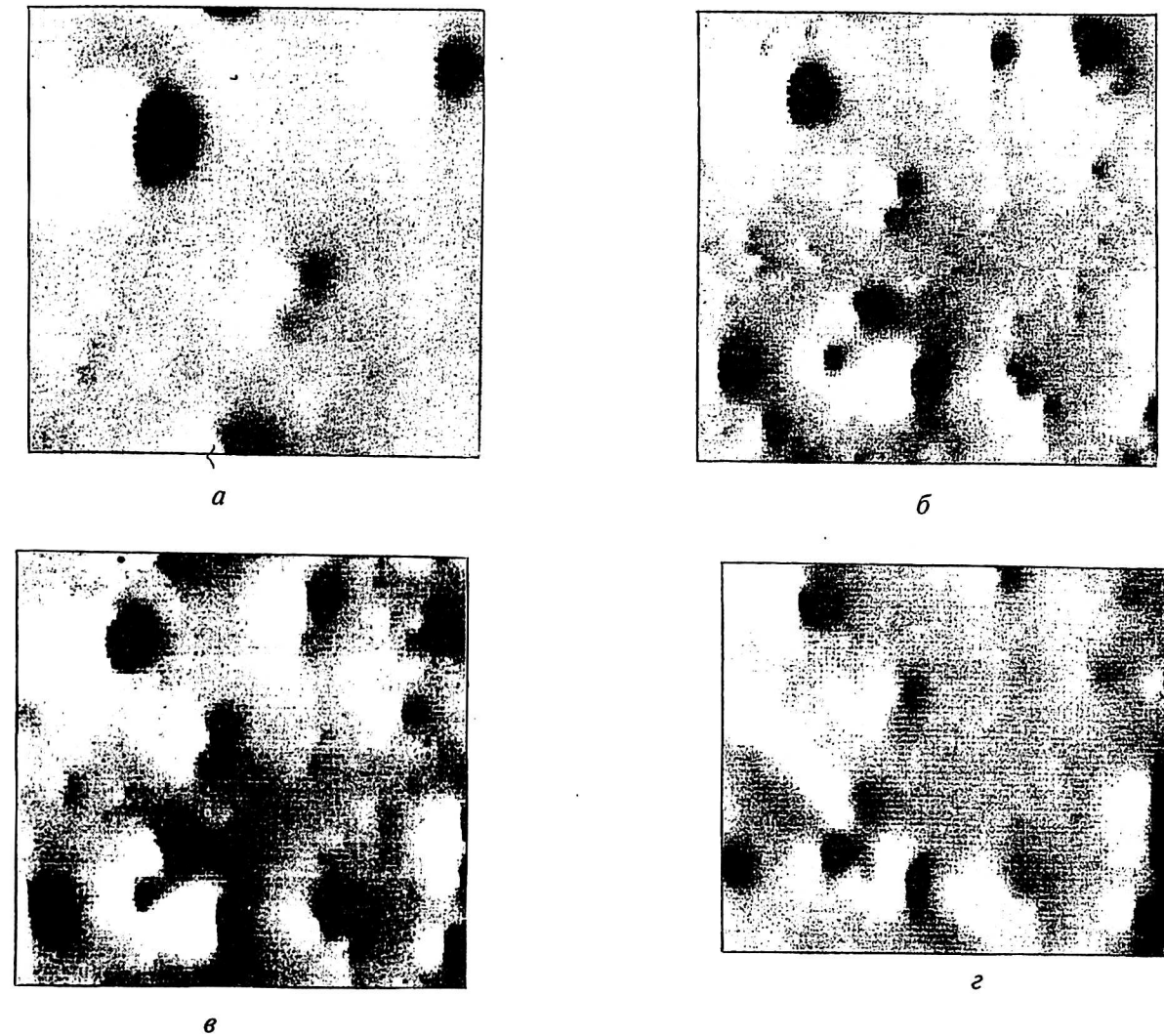


Рис. 5. СЛМ-изображения фрагмента МЛЭ КРТ, полученные между этапами послойного травливания (а, б, в, г), и палитра (д): а — исходный образец толщной пленки 12,6 мкм; размеры 1000х1000 мкм²; б — первое травление — 2,5 мкм; 1500х1500 мкм²; в — второе травление — 2,7 мкм; 1500х1500 мкм²; г — третье травление — 2,7 мкм; остаточная толщина пленки — 4,7 мкм; 1500х1300 мкм². Образец: $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$, $\rho = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 78 \text{ К}$

Измерения пространственного распределения концентраций фоновых примесей позволяют судить о наличии структурных дефектов в материале. Полагая, что фоновая примесь, появляющаяся в процессе изготовления и обработки МЛЭ КРТ, накапливается в областях скопления структурных дефектов, по всплескам концентрации фоновой примеси можно судить о наличии таких дефектов. Образец *p*-КРТ был исследован с помощью ВИМС. Результаты показаны на рис. 6, а. Та же область полупроводника была исследована с помощью СЛМ (см. рис. 6, б).

Качественное сравнение результатов для одного и того же фрагмента образца позволяет говорить о корреляции пространственного расположения дефектов, выявляемых с помощью ВИМС и СЛМ. Электрические неоднородности, детектируемые СЛМ, совпадают по местоположению с всплесками концентрации фоновой примеси (Cu, Li, As, C) в образце. На основании этого можно предположить, что структурные дефекты МЛЭ КРТ являются причиной появления электрически активных неоднородностей.

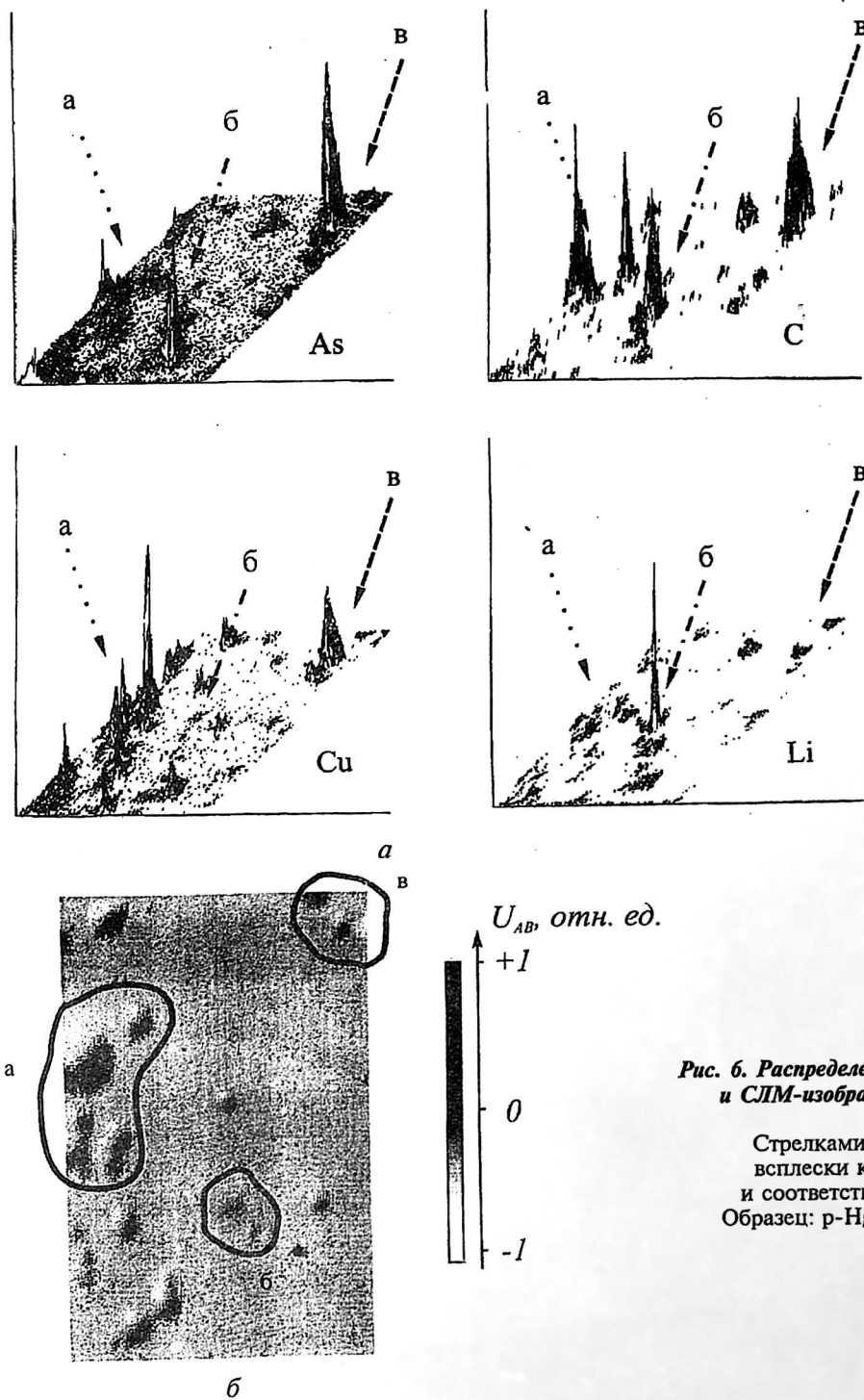


Рис. 6. Распределения концентраций фоновых примесей (а) и СЛМ-изображение фрагмента (1000×1000 мкм²) пленки МЛЭ КРТ (б).

Стрелками и замкнутыми линиями указаны всплески концентрации фоновых примесей и соответствующие им СЛМ-неоднородности. Образец: p -Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te, $p=2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $T = 78$ К

Заклучение

Проведено исследование параметров эпитаксиальных пленок КРТ различных составов с целью определить степень влияния неоднородности исходного материала на параметры многоэлементных фотоприемников.

Показано, что неоднородность МЛЭ КРТ служит причиной существенного разброса параметров планарных диодов. Дефекты, характеризующиеся встроенным электрическим полем, имеют объемный характер. В этих областях наблюдается всплеск концентрации фоновых при-

месей. Полагая, что фоновые примеси накапливаются в областях с повышенной концентрацией структурных дефектов, можно предположить, что этот тип дефектов является причиной появления электрических неоднородностей, регистрируемых СЛМ.

Для более детального определения характера неоднородностей, регистрируемых СЛМ, требуются дальнейшие исследования корреляции формы и амплитуды СЛМ-сигнала с пространственным распределением структурных дефектов в слоях МЛЭ КРТ.

Examination of MBE MCT layers by the method of the scanning laser microscopy

P. Yu. Pak, V. A. Fateev, V. V. Shashkin
Institute for Physics of Semiconductors, Novosibirsk, Russia

The method of the scanning laser microscopy (SLM) was applied for examination of a spatial distribution of the electrically active areas in the MBE MCT layers with compositions of $x = 0.22$ and $x = 0.3$, and also in arrays of MCT planar photodiodes. The correlation between results of SLM examination of a piece of an planar photodiodes array and their volt-ampere characteristics is detected. Character of allocation of electrical inhomogeneities in a volume of an MCT epilayer is investigated with the help of a level-by-level release. Comparison of the SLM image of a MBE MCT piece with lateral views of a spatial distribution of concentration of background impurities (C, Cu, As, Li), obtained with the help of a procedure of a secondary ionic mass spectroscopy (SIMS), allows to speak about a correlation of attitude of electrical inhomogeneities with a spatial distribution of background impurities.