

## Электрохимическое профилирование структур $n^+/n$ GaAs для полевых транзисторов

© Д.Ю. Протасов<sup>1,2</sup>, П.П. Камеш<sup>2</sup>, К.А. Свит<sup>1</sup>, Д.В. Дмитриев<sup>1</sup>, А.А. Макеева<sup>1</sup>,  
Э.М. Рзаев<sup>3</sup>, К.С. Журавлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Акционерное общество „Зеленоградский нанотехнологический центр“, 124527 Москва, Зеленоград, Россия

E-mail: protasov@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 14 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 31 января 2024 г.

Принята к публикации 31 января 2024 г.

Показано, что при использовании стандартного рецепта электрохимического профилирования, в котором применяется интенсивное освещение галогеновой лампой мощностью до 250 Вт  $n^+/n$  GaAs-структуры для генерации необходимых для травления дырок, при использовании электролита этилендиаминуксусной кислоты получаемый профиль распределения электронов отличается от задаваемого во время роста для концентрации электронов в  $n^+$ -слое  $> 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Такое отличие связано с появлением и развитием ямок травления, обусловленных увеличением степени дефектности слоев GaAs при возрастании концентрации донорной примеси — кремния. Для получения адекватных профилей распределения электронов в  $n^+/n$  GaAs-структурах необходимо ограничивать освещение до 25 Вт.

**Ключевые слова:** электрохимическое профилирование,  $n^+/n$  GaAs, дефекты травления, искажение профиля концентрации.

DOI: 10.61011/FTP.2024.01.57636.5562

### 1. Введение

Структуры, используемые в настоящее время для создания различных полупроводниковых приборов, часто содержат несколько разных слоев, различающихся типом легирующей примеси и уровнем легирования. Для получения приборов с требуемыми параметрами необходимо точно задавать и выдерживать параметры структур. Поскольку условия роста структур могут изменяться со временем, параметры выращенных структур приходится периодически контролировать. Для контроля распределения примесей в слоях структуры используется метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ЭХП) [1]. При использовании электролита, как для травления, так и для формирования контакта Шоттки с полупроводником, ЭХП-профилометрия является оптимальным методом для определения профиля распределения концентрации носителей заряда по слоям структур и для определения годности структур для изготовления приборов. В этом методе возможно травление образца на глубину до нескольких микрон с точностью травления не хуже 1 нм [2]. Это позволяет применять его для контроля параметров современных наноструктур, толщины отдельных слоев которых достигают единиц нанометров.

На сегодняшний день гетероструктуры на основе арсенида галлия широко применяются для изготовления транзисторов сантиметрового [3] и миллиметрового

диапазонов [4], высокочастотных ключевых транзисторов [5], для создания фотонных интегральных схем на кремнии [6], а также структуры  $n^+/n$  для производства полевых транзисторов с толщинами легированных слоев в десятки и сотни нанометров. Методы ЭХП таких структур в настоящее время активно совершенствуются [7,8]. Обнаружено, что при определении профиля концентрации этим методом в структурах  $n^+/n$  GaAs переход от  $n^+$ -слоя к  $n$ -слою может сильно размываться [9], что затрудняет определение концентрации и толщины  $n$ -слоя. Однако в этой работе не анализируются условия ЭХП, которые приводят к такому изменению профилей концентрации. В работе [10] показано, что подобное искажение профиля концентрации в структурах  $n/n^+$  GaAs может появляться вследствие неоднородности электрохимического травления при неправильном выборе электролита, условия ЭХП при этом также не рассматриваются.

Как известно, электрохимическое травление происходит за счет дрейфа дырок в электрическом поле к границе раздела полупроводник/электролит, где они „высвобождают“ валентные электроны атомов, и получившийся положительно заряженный ион переходит в электролит [1]. Электрохимическое травление транзисторных структур GaAs затруднено тем, что на их поверхности создается  $n^+$ -слой с концентрацией электронов в диапазоне  $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$  для улучшения свойств омических контактов. Так как концентрация неосновных

дырок в широкозонных слоях  $n$ -типа, а тем более в  $n^+$ -слое, низкая, распространенной практикой является использование оптического излучения для генерации электрон-дырочных пар [11].

Известно, что электрохимическое и фотохимическое травление слоев GaAs в определенных режимах приводит к возникновению шероховатостей [12], вплоть до развития пористой структуры [13]. При ЭХП структур с наноразмерными слоями с различными уровнями легирования это вызовет неверное определение профиля концентрации электронов. В связи с этим цель данной работы заключается в установлении связи между режимом травления и концентрацией электронов в  $n^+$ -слое структур  $n^+/n$  GaAs на получаемый профиль распределения концентрации электронов. Для достижения цели подтверждались достоверность результатов ЭХП слоев GaAs с однородным легированием. Варьировались как мощность оптического излучения, так и концентрация в контактном  $n^+$ -слое структур  $n^+/n$  GaAs. Для изучения дефектности  $n^+$ -слоев использовался метод фотолюминесценции (ФЛ). Качественно объяснена связь наблюдаемых профилей распределения концентрации электронов с морфологией ямок травления.

## 2. Образцы и экспериментальные методы

Для исследования влияния режимов электрохимического травления на распределение концентрации электронов использовались структуры GaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на еpi-ready полупроводящих подложках GaAs с ориентацией (100) производства Xiamei (Китай). Для роста использовалась установка Compact-21 T (Франция). Сначала на подложках выращивался нелегированный буферный слой толщиной 0.8 мкм, в середину которого встраивалась короткопериодная сверхрешетка  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$  (2 нм/2 нм), содержащая 7 периодов. Далее выращивались легированные слои структуры. Легирование осуществлялось кремнием во время роста, различная концентрация электронов при этом достигалась изменением температуры источника кремния. Зависимость между температурой источника кремния и концентрацией электронов в слое GaAs была определена предварительно при помощи выращивания серии тестовых структур GaAs, в которых концентрация электронов определялась по измерению эффекта Холла. Всего было исследовано 8 структур GaAs, из них 5 с однородным легированием и 3 структуры  $n^+/n$ . Толщины слоев и полученные во время роста концентрации электронов в исследуемых образцах представлены в таблице.

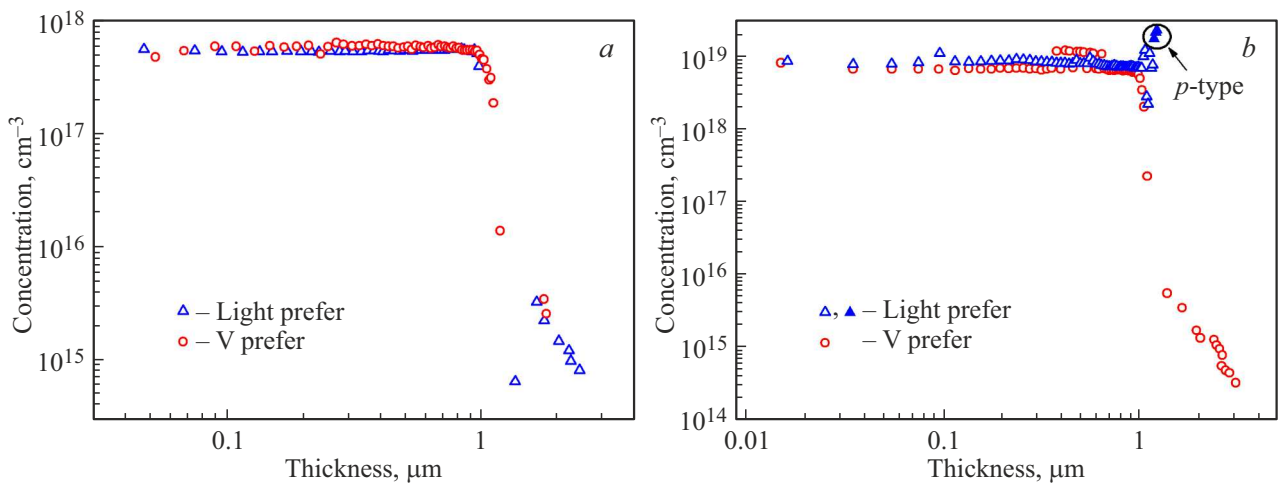
Структуры C6370, C3816, C3523, C4704 и C4172 являлись однослойными, концентрация электронов в этих структурах была определена из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Структуры C6370 и C3816

Толщины слоев и концентрации электронов в структурах GaAs

Номер структуры	Толщина, нм	Концентрация, $см^{-3}$
C6370	1000	$4.3 \cdot 10^{17}$
C3816	1000	$6.4 \cdot 10^{18}$
C3523	1000	$2.9 \cdot 10^{18}$
C4704	1000	$5.1 \cdot 10^{18}$
C4172	1000	$7.1 \cdot 10^{18}$
C5419	50	$1 \cdot 10^{19}$
	150	$2 \cdot 10^{17}$
C5096	100	$6 \cdot 10^{18}$
	150	$3 \cdot 10^{17}$
	150	$4 \cdot 10^{18}$
C6375	150	$4.2 \cdot 10^{17}$

предназначались для обоснования достоверности полученных методом ЭХП результатов. Структуры C3523, C4704 и C4172 с высокой концентрацией использовались для установления связи между дефектностью и уровнем легирования при помощи метода ФЛ. Транзисторные структуры (C5419, C5096 и C6375) состояли из двух слоев:  $n^+$ -GaAs контактного слоя и  $n$ -GaAs слоя канала транзистора, сильно различающихся уровнями легирования. В этих структурах варьировалась концентрация электронов в контактном слое от  $4 \cdot 10^{18}$  до  $1 \cdot 10^{19} см^{-3}$ . Толщина контактного слоя лежала в диапазоне от 50 до 150 нм. Ниже контактного слоя располагался слой канала с концентрацией в диапазоне  $(2.5-4.2) \cdot 10^{17} см^{-3}$  и толщиной 150 нм.

Для ЭХП использовалась установка „Wafer Profiler CVP21“ (Германия). Травление осуществлялось электролитом EE (EDTA<sub>0.1m</sub>-ED10% — раствор динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты в 10% водном растворе этилендиамина), рекомендованном для ЭФП гетероструктур  $A^{III}B^V$  [14]. Так как исследуемые структуры имели полупроводящую подложку, общий контакт располагался на поверхности структур. Для улучшения омического контакта перед измерением поверхность образца в месте контакта пробивали искрой высоковольтного разряда и залуживали индием. Ямка травления ограничивалась прижимным кольцом площадью 10 мм<sup>2</sup>. Процесс электрохимического травления происходил под управлением программного обеспечения, которое поддерживало фиксированное значение плотности тока, а значит, и скорости травления, изменяя два параметра: приложенное напряжение на контакте Шоттки и интенсивность освещенности образца. Применялись два режима травления — „V Prefer“, когда приемлемая скорость травления достигалась увеличением напряжения при минимальной подсветке ( $\leq 10\%$  от максимума), и „Light Prefer“, когда скорость травления регулировалась мощностью излучения галогеновой лампы Osram HLX64657 с цветовой температурой 3450 К и максимальной мощностью 250 Вт. Спектр излучения, падающего на



**Рис. 1.** Профили концентрации носителей заряда в однородно легированных структурах C6370 (a) и C3816 (b). Режимы: „Light prefer“ — синие треугольники, „V prefer“ — красные окружности. Тип проводимости: электронный — пустые символы, дырочный — заполненные символы.

исследуемый образец, был ограничен в коротковолновой области фильтром CalFlex X с полосой пропускания 750–1100 нм, а в длинноволновой области — поглощением в водном растворе электролита (~900 нм), что соответствует энергиям фотонов 1.65–1.4 эВ. Этой энергии достаточно для генерации электрон-дырочных пар в GaAs с шириной запрещенной зоны 1.42 эВ при 300 К.

Для измерения шероховатости поверхности использовался атомно-силовой микроскоп „Bruker Multi Mode 8“, оптическое изображение поверхности ямок травления было получено при помощи металлографического прямого микроскопа ММН-2. Для исследования дефектов травления использовался растровый электронный микроскоп „Hitachi SU8220“. Профили ямок травления измерялись при помощи оптического профилометра MicroProf200. Спектры ФЛ регистрировались спектрометром Acton SP2500 (Princeton Instruments), оснащенным CCD-камерой с охлаждением жидким азотом. В качестве возбуждающего источника света служил твердотельный лазер с длиной волны излучения 527 нм. Спектры ФЛ измерялись при температуре жидкого азота 77 К.

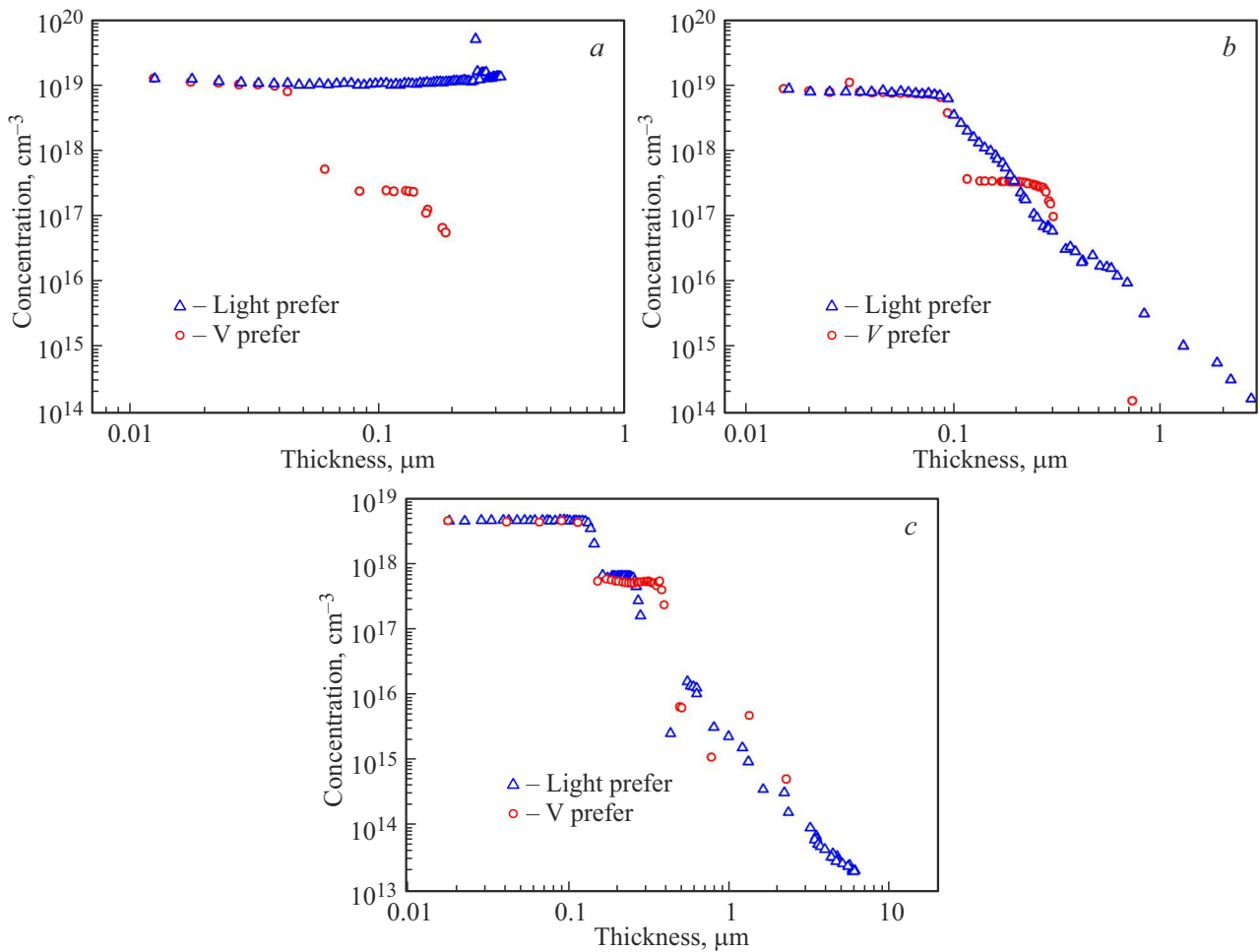
### 3. Профили распределения электронов

#### 3.1. Однородно легированные слои GaAs

Распределения концентрации электронов по глубине для структур C6370 и C3816 с однородным легированием, полученные в двух режимах ЭХП, приведены на рис. 1, a и b. Тип проводимости определялся во время профилирования по наклону зависимости  $C$  от  $V$  и также показан на рис. 1.

Из рис. 1, a видно, что для структуры C6370 в обоих режимах профилирования измеряется близкая кон-

центрация электронов и толщина легированного слоя  $n$ -GaAs (1 мкм) согласуется с толщиной, заданной во время роста. Усредненная по толщине пленки концентрация электронов, определенная в режиме „V prefer“, составляет  $5.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а в режиме „Light prefer“ —  $5.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация электронов  $4.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , определенная по измерениям эффекта Холла, соответствует результатам ЭХП с учетом 15-процентной погрешности метода Ван дер Пау для используемых нами образцов квадратной формы с небольшими контактами по углам [15] и с учетом холл-фактора [16]. Параметры электрохимического травления также практически идентичны для двух режимов: плотности тока лежат в диапазоне 0.5–0.48 мА/см<sup>2</sup>, скорости травления — 0.4–0.58 мкм/ч и прикладываемое напряжение изменяется от –0.4 до 2.0 В. Из рис. 1, b следует, что для структуры C3816 с большой концентрацией электронов профили концентрации в области легированного слоя толщиной 1 мкм, измеренные в разных режимах травления, различаются сильнее. В этом слое структуры средняя концентрация электронов, определенная в режиме „V prefer“, составляет  $6.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а в режиме „Light prefer“ —  $7.9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . По измерениям эффекта Холла концентрация электронов равна  $6.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что лучше совпадает с данными, полученными в режиме „V prefer“. Более того, после стравливания проводящего слоя толщиной 1 мкм в режиме „Light prefer“ не происходит уменьшение концентрации электронов. Измеряемая зависимость  $C$  от  $V$  перестает быть убывающей или возрастающей функцией, характерной для диода Шоттки, и принимает вид низкочастотной вольт-фарадной характеристики с выраженным минимумом, поэтому установка начинает определять  $p$ -тип проводимости. Параметры электрохимического травления, однако, отличаются незначительно для используемых режимов травления — плотность тока лежит в диапа-



**Рис. 2.** Профили распределения концентрации электронов в  $n^+/n$  GaAs-структурах C5419 (a), C5096 (b), C6375 (c), измеренные в двух режимах: Light prefer — синие треугольники и V prefer — красные окружности. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

зоне  $0.4\text{--}0.5$  мА/см<sup>2</sup>, скорости травления приблизительно одинаковы —  $0.57$  мкм/ч.

### 3.2. Структуры $n^+/n$ GaAs

На рис. 2 показаны профили для трех  $n^+/n$  GaAs-структур, имеющих различную концентрацию электронов в контактном слое. Профили концентрации электронов, полученные для этих структур в разных режимах, различаются сильнее, чем для случая однородных образцов.

Как видно из рис. 2, a, для структуры C5419 в обоих режимах концентрация электронов в верхнем  $n^+$ -слое равна  $1.1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, что соответствует концентрации электронов в таблице. В режиме „Light prefer“, однако, не наблюдаются  $n$ -слой и нелегированный буферный слой. При стравливании слоя толщиной  $300$  нм, превышающего суммарную толщину проводящей области структуры, концентрация электронов не уменьшается и остается на уровне  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. В этом режиме уровень освещения образца уменьшался от  $100$  до  $28\%$  по мере

увеличения глубины травления. Для режима „V prefer“ профиль концентрации электронов практически точно соответствует ростовым данным: концентрация электронов в верхнем слое  $1.1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> и толщина, определяемая по спаду концентрации электронов в 2 раза, равна  $47$  нм, в канальном  $n$ -слое концентрация электронов  $2.5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и толщина —  $110$  нм. Неточность в определении толщины канального слоя может быть связана с тем, что метод ЭХП имеет разрешение по глубине порядка двух длин экранирования Дебая [1]. Для концентрации электронов  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> в GaAs длина экранирования равна  $\sim 10$  нм. Уровень освещения в этом режиме не превышал  $10\%$ . Отметим, что наличие освещения практически не повлияло на скорость травления структуры, в режиме „Light prefer“ среднее значение скорости составило  $0.31$  мкм/ч, а в режиме „V prefer“ —  $0.3$  мкм/ч. Измерения глубины травления на установке MicroProf200 не позволили определить ее значение для режима „Light prefer“ вследствие ее малости в центре области травления. В режиме „V prefer“ глубина трав-

ления составила 195 нм, что почти совпадает с общей толщиной проводящего слоя структуры. Из рис. 2, *b* видно, что при более низкой заданной концентрации электронов  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в верхнем  $n^+$ -слое структуры C5096 измеренная концентрация электронов одинакова для всех режимов травления и равняется  $7.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что несколько превосходит задаваемое значение. При дальнейшем увеличении глубины травления в режиме „V prefer“ отчетливо видна ступенька, связанная с переходом к  $n$ -слою канала транзистора. Определенная в этом режиме толщина  $n^+$ -слоя составляет 93 нм, что соответствует толщине  $n^+$ -слоя, задаваемой во время роста. Полученные значения концентрации электронов и толщина  $n$ -слоя равны  $3.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и 194 нм соответственно. Как можно видеть, концентрация электронов практически совпадает с приведенной в таблице, а толщина получилась завышенной на  $\sim 50$  нм. В режиме „Light prefer“, однако, ступенька на профиле распределения электронов слабо выражена, наблюдается постепенное уменьшение концентрации электронов вплоть до величины  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . По данному профилю можно определить только толщину  $n^+$ -слоя, которая составляет 97 нм. Уровень освещения в режиме „Light prefer“ при травлении  $n^+$ -слоя был равным 35%, а при травлении  $n$ -слоя — 14%. В режиме „V prefer“ уровень освещения не превышал 11%. Скорость травления не зависела от режима травления и составляла  $\sim 0.3$  мкм/ч. Глубина травления, определенная на установке MicroProf200, составила 240 и 340 нм для режимов „Light prefer“ и „V prefer“ соответственно. Так как суммарная толщина проводящих слоев структур, по данным таблицы, равна 250 нм, в обоих случаях проводящие слои были стравлены. На рис. 2, *c* представлены профили в структуре C6375, с наименьшей концентрацией электронов, равной  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Все слои структуры отчетливо видны на профилях как при использовании режима „Light Prefer“, так и „V Prefer“. Измеренная концентрация электронов в верхнем  $n^+$ -слое не зависит от режима травления и составляет  $4.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что согласуется с приведенным в таблице значением. Толщина контактного слоя составляет 144 нм в режиме „Light prefer“, в режиме „V prefer“ она получилась  $< 125$  нм. Оба значения получились меньше задаваемой во время роста толщины 150 нм. Вторая ступенька на профилях концентрации связана с  $n$ -слоем канала транзистора. Концентрация электронов в нем для режима „Light Prefer“ составляет  $6.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , для режима „V prefer“ она получилась чуть ниже  $5.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Оба значения превышают указанную в таблице концентрацию электронов  $4.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя канала в режиме „Light Prefer“ составляет 130 нм, в режиме „V prefer“ — 266 нм. Уровень освещения в режимах „Light prefer“ и „V prefer“ лежал в диапазоне 17 — 20%. Скорость травления также не зависела от режима травления и составляла  $\sim 0.3$  мкм/ч. Глубина травления, определенная на установке MicroProf200, составила 230 и 290 нм для режимов „Light prefer“ и „V prefer“, соответственно. Для этой структуры только в

режиме „V prefer“ можно считать, что вся проводящая часть структуры (300 нм) была стравлена.

### 3.3. Морфология поверхности лунок травления

При помощи атомно-силового микроскопа было установлено, что шероховатость поверхности в центре лунок травления для всех образцов слабо зависит от используемого режима травления, ее среднеквадратическое значение лежит в диапазоне 1.5–3 нм. У края лунки травления морфология поверхности отличается в образцах с различной концентрацией электронов и зависит от режима травления.

На рис. 3, *a* и *b* полукруг отмечает положение прижимного кольца, ограничивающего область травления. С внутренней стороны этого полукруга располагается вытравленная область. Как видно из рисунка, для режима „V prefer“ в лунке травления отсутствуют значительные дефекты поверхности. Наоборот, для режима „Light prefer“ у края лунки травления присутствуют многочисленные протравы. Исследования при помощи растрового электронного микроскопа показали, что средний диаметр протрав составляет 20 мкм, а их глубина — 7–9 мкм. Для структуры C5096 с концентрацией электронов в контактном слое  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  протравы в режиме „Light prefer“ имели на порядок меньшие размеры, а для структуры C6375 с концентрацией электронов  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  они отсутствовали.

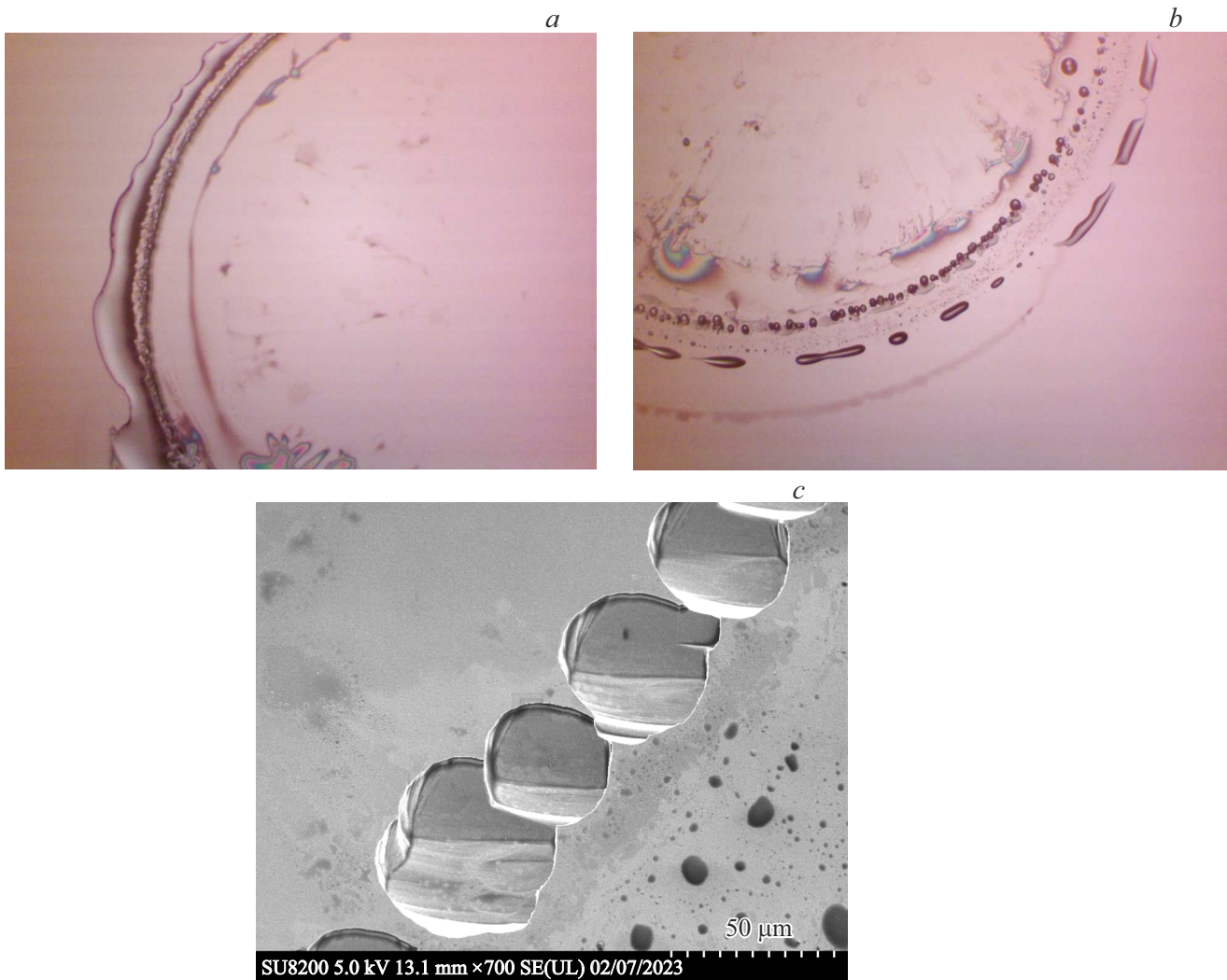
## 4. Обсуждение

В процессе электрохимического травления прошедший по цепи заряд равен суммарному заряду ионов, перешедших из полупроводника в электролит. Измеряя зависимость тока в цепи  $I(t)$  от времени и зная параметры полупроводника (молярную массу  $M$ , плотность  $\rho$  и валентность  $N_V$ ), можно вычислить объем стравленного слоя по закону Фарадея для электролиза [1]:

$$V_{etch} = \frac{\int_0^t I(t) dt}{q \cdot N_V} \cdot \frac{M}{N_A \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $q$  — элементарный заряд и  $N_A$  — число Авогадро. Так как площадь травления задается размером прижимного кольца, по вытравленному объему рассчитывается глубина травления. Оценим объем материала, удаленный из  $n^+$ -слоя и из протравов, расположенных у края лунки травления. В наших экспериментах площадь прижимного кольца составляла  $10 \text{ мм}^2$ . Для структуры C5419 объем  $n^+$ -слоя оценим как  $V_{n^+} = S_k \cdot d_{n^+} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3$ . Из рис. 3, *b* видно, что количество протравов, приходящихся на 1/4 периметра ямки травления равно  $\sim 50$  штук. Тогда общее количество протравов в ямке травления будет равно  $N_d = 200$  штук. Объем одного протрава рассчитаем как  $V_d = \pi \cdot a^2 \cdot h/4$ , где  $a$  — средний размер протрава





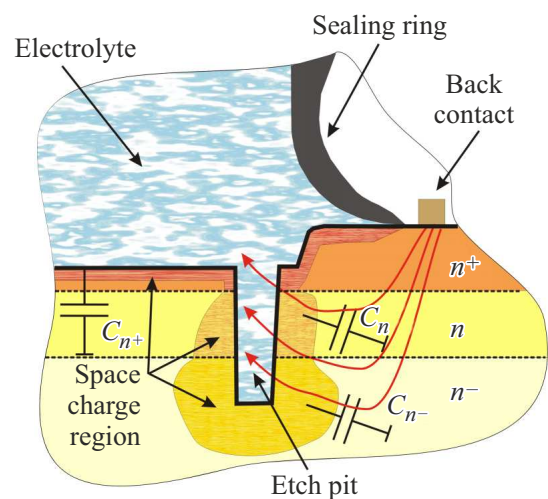
**Рис. 3.** Изображения поверхности лунки травления для структуры C5419: *a* — режим „V prefer“ (оптический микроскоп), *b* — „Light prefer“ (оптический микроскоп), *c* — изображение протравов у края лунки травления в растровом электронном микроскопе.

(20 мкм), а  $h$  — средняя глубина протрава (8 мкм).  
Получаем суммарный объем протравов

$$V_{\sum d} = N_d \cdot V_d \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3.$$

Следовательно, оценка дает, что объемы  $n^+$ -слоя и протравов приблизительно равны. Поэтому при использовании выражения (1) для вычисления толщины стравленного слоя получается завышенное значение. Этот вывод подтверждается измерением профиля лунок травления на установке MicroProf200, которой из-за малой величины не удалось определить глубину травления в режиме „Light prefer“ для структуры C5419. Для оценки измеряемой емкости рассмотрим схему, приведенную на рис. 4.

При подаче на контакт Шоттки обратного напряжения области пространственного заряда (ОПЗ) появляются как в  $n^+$ -слое, так и в  $n$ -слое и нелегированной области структуры ( $n$ -слой). Толщина ОПЗ определяется длиной



**Рис. 4.** Схема, поясняющая влияние протравов на измеряемые значения емкости при профилировании структур  $n^+/n$  GaAs.

экранирования Дебая, которая рассчитывается по формуле

$$L_{D_i} = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s\epsilon}{e^2N_i}}, \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура во время измерений (300 K), статическая диэлектрическая проницаемость GaAs  $\epsilon_s = 12.9$ ,  $\epsilon$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $e$  — элементарный электрический заряд,  $N_i$  — концентрация электронов в  $n^+$ -,  $n$ - и  $n$ -слоях (для последнего слоя использовалось значение концентрации  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Рассчитанные значения ширины ОПЗ в этих слоях равняются 1.4, 9.6 и 135.7 нм соответственно. Емкости слоев  $C_{n^+}$ ,  $C_n$  и  $C_{n^-}$  оценим, используя приближение плоского конденсатора. При этом площадь обкладок для  $C_{n^+}$  равна площади, ограниченной прижимным контактом ( $10 \text{ мм}^2$ ), для  $C_n$  она равна площади боковой поверхности цилиндра высотой 150 нм ( $\approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2$ ), а для  $C_{n^-}$  — сумме площадей боковой поверхности цилиндра высотой 8 мкм и основания ( $\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ ). С учетом суммарного количества протравов рассчитываем значения этих емкостей:  $C_{n^+} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$ ,  $C_n = 2 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$  и  $C_{n^-} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$ . Так как эти емкости соединены параллельно, значит, их суммарная величина больше самой наибольшей. Следовательно, суммарная емкость определяется емкостью  $n^+$ -слоя, вклады от двух других слоев структуры гораздо меньше. Расположение большинства протравов вблизи прижимного кольца обусловлено особенностями протекания тока между базовым электродом и контактом Шоттки в исследуемых структурах  $n^+-n$ . Возможные пути тока показаны на рис. 4 красными линиями. В  $n^+$ -слое ток должен растекаться однородно вследствие его высокой проводимости. Так как травление идет преимущественно вниз, ток заходит в контакт Шоттки со стороны подложки. Естественно, что его плотность будет иметь максимальное значение вблизи края лунки травления, где и расположены протравы. Подобные краевые явления наблюдались при электрохимическом травлении кремния [17] и объяснялись неоднородностью распределения плотности тока при освещении [18].

Следовательно, измеренную зависимость концентрации электронов от глубины для структуры C5419 с самым сильно легированным  $n^+$ -слоем можно объяснить следующим образом. При освещении структуры создается большой поток дырок к границе раздела электролит-полупроводник. Так как они проходят через  $n^+$ -слой, значительная часть дырок не доходит до границы раздела вследствие рекомбинации. Вероятность пройти через  $n^+$ -слой и освободить атом на поверхности у дырок будет больше в электрическом поле, так как вследствие дрейфа они проходят  $n^+$ -слой быстрее. При локальном травлении  $n^+$ -слоя скорость травления резко возрастает из-за большей вероятности дырок выйти на границу раздела электролит-полупроводник и глубина протрава увеличивается. При этом травление происходит преимущественно в протравах, обеспечивая необходимый

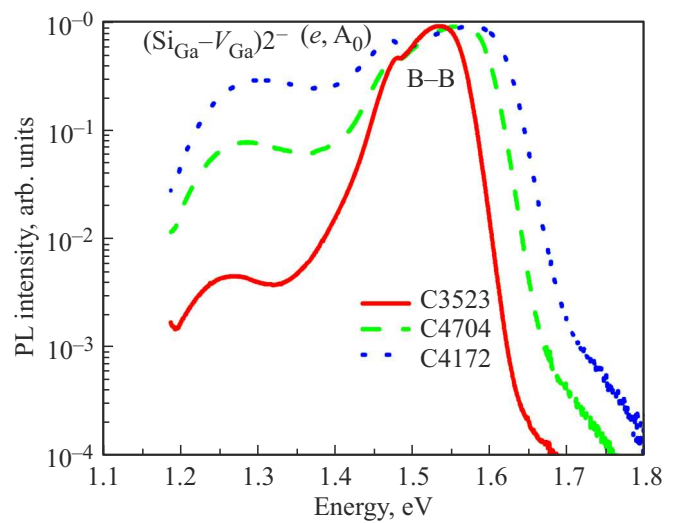


Рис. 5. Спектры ФЛ для однородно легированных структур  $n^+$ -GaAs при 77 K.

уровень плотности тока. Согласно выражению (1), эта плотность тока пересчитывается в глубину травления, которая существенно больше стравленной толщины  $n^+$ -слоя структуры. Так как измеряемая емкость все время определяется исключительно емкостью  $n^+$ -слоя, рассчитываемая на основе измерения этой емкости концентрация также остается постоянной. При уменьшении концентрации в верхнем слое до  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  размеры протравов уменьшаются, в результате травления  $n^+$ -слой стравливается полностью в обоих режимах. По-видимому, он стравливается неоднородно, чем обусловлено затягивание профиля концентрации в области  $n$ -слоя и плавный переход к концентрации  $n$ -слоя.

Пороговый характер возникновения протравов, т. е. их отсутствие при концентрации в  $n^+$ -слое  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , появление при  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и увеличение размеров при  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , связан с увеличением дефектности  $n^+$ -слоя с ростом уровня легирования. В структурах GaAs при увеличении концентрации легирующей примеси возрастает как концентрация вакансий галлия ( $V_{\text{Ga}}$ ), так и комплексов ( $V_{\text{Ga}}-\text{Si}_{\text{Ga}}$ ) [19]. Для оценки уровня дефектности наших образцов для серии однородно легированных слоев GaAs, выращенных в тех же условиях, что и  $n^+$ -слои  $n^+/n$  структур из таблицы, были измерены спектры ФЛ при температуре 77 K.

Концентрация электронов в данных образцах приведена в таблице. Как видно из рис. 5, в спектрах ФЛ отчетливо видны три полосы с энергиями максимумов вблизи 1.5, 1.47 и 1.25 эВ. Высокоэнергетичная полоса с энергией  $\sim 1.5$  эВ соответствует рекомбинации зона-зона (B-B). Данная полоса сдвигается с увеличением концентрации электронов и заполнения уровней в зоне проводимости (сдвиг Бурштейна-Мосса). Сравнительно узкая полоса с энергией  $\sim 1.47$  эВ соответствует рекомбинации зона-нейтральный акцептор ( $e, A_0$ ). В ка-

честве нейтрального акцептора может выступать как фоновая примесь углерода, так и  $\text{Si}_{\text{As}^-}$ , так как, согласно расчетам, данный вариант встраивания атомов кремния является наиболее выгодным по энергии после  $\text{Si}_{\text{Ga}^+}$  [20]. Третья полоса с энергией  $\sim 1.2$  эВ часто встречается в сильно  $n^+$ -легированном GaAs и соответствует комбинации через комплексы  $V_{\text{Ga}}$ -мелкий донор [21]. В нашем случае видно, что интенсивность данного пика резко возрастает с увеличением уровня легирования, что свидетельствует об увеличении дефектности образцов. Известно, что при электрохимическом травлении слоев GaAs происходит растравливание дефектов [22,23]. В результате при локальном стравливании  $n^+$ -слоя в области дефекта скорость травления многократно увеличивается из-за большей вероятности фотогенерированных дырок дойти до поверхности  $n$ -слоя и тем более  $n$ -слоя по сравнению с  $n^+$ -слоем. В результате возникают протравы, приводящие к искажению данных ЭХП.

## 5. Заключение

При электрохимическом профилировании структур  $n^+ - n$  GaAs получаемый профиль распределения электронов зависит как от условий профилирования, так и от концентрации в  $n^+$ -слое. При концентрации электронов в  $n^+$ -слое  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  профиль распределения электронов, близкий к задаваемому во время роста, в слоях толщиной  $\sim 100$  нм удается получить как при использовании освещения (режим „Light prefer“), так и без него (режим „V prefer“). Профиль лунок травления близок к прямоугольному в обоих режимах. При увеличении концентрации электронов в  $n^+$ -слое до  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  вследствие неоднородности плотности тока при освещении через контакт электролит-полупроводник и увеличившейся дефектности начинают образовываться локальные протравы, сосредоточенные у края прижимного кольца. При этом электролит, помимо контакта с  $n^+$ -слоем, начинает контактировать с более глубоко лежащими  $n$ - и  $n$ -слоями структуры. В результате измеряемая емкость структуры изменяется, и получаемый профиль распределения электронов искажается в области  $n$ -слоя. Профиль распределения электронов, полученный в режиме „V prefer“, близок к профилю, заданному во время роста. При концентрации электронов в  $n^+$ -слое  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  электрохимическое травление в режиме „Light prefer“ идет исключительно в локальных протравах с размерами  $20 \times 20$  мкм и глубиной  $7 - 9$  мкм. Травление в центральной части лунки отсутствует. В результате емкость структуры не изменяется во время травления, не реагируя на наличие  $n$ - и  $n$ -слоев. В режиме „V prefer“ удается правильно определить параметры слоев  $n^+ / n$  структуры.

Для получения правильного профиля распределения концентрации электронов в структурах  $n^+ / n$  GaAs необходимо либо проводить профилирование полностью без освещения, либо ограничить мощность подсветки. Для

используемой в данной работе установки мощность галогеновой лампы ограничивалась на уровне 25 Вт для предотвращения искажения профиля распределения концентрации.

Измерения на атомно-силовом микроскопе и растровом электронном микроскопе выполнены на оборудовании ЦКП „Наноструктуры“.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП СО РАН (тема № FWGW-2022-0005).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P. Blood. *Semicond. Sci. Technol.*, **1**, 7 (1986).
- [2] <http://www.wepcontrol.com/cv-profiler/>
- [3] К.С. Журавлев, Д.Ю. Протасов, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Д.В. Гуляев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский. *Автоматрия*, **56** (5), 1 (2020).
- [4] A.B. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, A.K. Bakarov, A.B. Gri-gorenko, K.S. Zhuravlev, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, I.A. Rogachev, E.V. Tereshkin, S.V. Shcherbakov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (1), 53 (2021).
- [5] D. Yu Protasov, D.V. Dmitriev, K.S. Zhuravlev, G.I. Ayzenshtat, A.Y. Yushchenko, A.B. Pashkovsky. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **153**, 107148 (2023).
- [6] M.O. Petrushkov, D.S. Abramkin, E.A. Emelyanov, M.A. Putyato, O.S. Komkov, D.D. Firsov, A.V. Vasev, M.Yu. Yesin, A.K. Bakarov, I.D. Loshkarev, A.K. Gutakovskii, V.V. Atuchin, V.V. Preobrazhenskii. *Nanomaterials*, **12**, 4449 (2022).
- [7] Г.Е. Яковлев, М.В. Дорохин, В.И. Зубков, А.Л. Дудин, А.В. Здравейцев, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин. *ФТП*, **52** (8), 873 (2018).
- [8] George Yakovlev, Vasily Zubkov. *J. Solid State Electrochem.*, **25**, 797 (2021).
- [9] T. Clarysse, G. Brammertz, D. Vanhaeren, P. Eyben, J. Goossens, F. Clemente, M. Meuris, W. Vandervorst, R. Srnanek, R. Kinder, B. Sciana, D. Radziewicz, Zhiqiang Li. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **11**, 259 (2008).
- [10] M. Kaniewska, I. Slomka. *Cryst. Res. Technol.*, **36** (8–10), 1113 (2001).
- [11] P.A. Kohl, F.W. Ostermayer. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **19**, 379 (1989).
- [12] Z. Mazouz, L. Beji, J. Meddeb, H. Ben Ouada. *Arabian J. Chemistry*, **4**, 473 (2011).
- [13] Emna Ben Amara, Amira Lebib, Lotfi Beji. *J. Electron. Mater.*, **49** (9), 5281 (2020).
- [14] A.R. Clawson. *Mater. Sci. Engin.*, **31**, 1 (2001).
- [15] Е.В. Кучис. *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования* (М., Радио и связь, 1990).
- [16] D.L. Rode. *Semiconductors and Semimetals, Transport Phenomena* (Academic Press, N.Y., 1975) v. 10, p. 1.
- [17] А.А. Нечитайлов, Е.В. Астрова. *Письма ЖТФ*, **33** (16), 19 (2007).
- [18] Е.В. Астрова, А.А. Нечитайлов. *ФТП*, **42** (4), 480 (2008).



- [19] J. Gebauer, R. Krause-Rehberg, C. Domke, Ph. Ebert, K. Urban. Phys. Rev. Lett., **78**, 3334 (1997).
- [20] John E. Northrup, S.B. Zhang. Phys. Rev. B, **47** (11), 6791(R) (1993).
- [21] V. Swaminathan. Bull. Mater. Sci., **4** (4), 403 (1982).
- [22] Ákos Nemcsics, Janos P. Makai. ФТП, **37** (6), 657 (2003).
- [23] M. Kayambaki, K. Tsagaraki, M. Lagadas, P. Panayotatos. Mater. Sci. Engin. B, **80**, 164 (2001).

Редактор Г.А. Оганесян

## The electrochemical profiling of $n^+/n$ GaAs structures for field-effect transistors

D.Yu. Protasov<sup>1,2</sup>, P.P. Kamesh<sup>2</sup>, K.A. Svit<sup>1</sup>,  
D.V. Dmitriev<sup>1</sup>, A.A. Makeeva<sup>1</sup>, E.M. Rzaev<sup>3</sup>,  
K.S. Zhuravlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rzhanov Institute of Semiconductors Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University,  
630073 Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Zelenograd Nanotechnology Center,  
124527 Moskow, Zelenograd, Russia

**Abstract** It is shown that when using a standard electrochemical profiling recipe that applies intensive illumination by halogen lamp with power up to 250 W of  $n^+/n$  GaAs structure to generate the holes necessary for etching, the resulting electron distribution profile differs from that set during growth for an electron concentration in the  $n^+$ -layer  $> 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  when using EDTA electrolyte. This difference is due to the appearance and development of etching pits caused by the increase in the degree of defectivity of GaAs layers with increasing concentration of the donor impurity — silicon. To obtain adequate electron distribution profiles in  $n^+/n$  GaAs structures it is necessary to limit the illumination up to 25 W.