

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОСТРУКТУР С $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ В ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩЕМ МАТЕРИАЛЕ

Гучмазов А. Б., Родригес Х.-А., Румянцев В. Д.

На примере AlGaAs-гетероструктур солнечных фотоэлементов (ФЭ) рассматриваются методика построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) $p-n$ -перехода и измерение внутреннего коэффициента сбора фотогенерированных носителей (Q_i) с использованием только люминесцентных данных (интенсивностей фото- и электролюминесценции) при фотовозбуждении. Сигнал ЭЛ выделяется за счет того, что малая часть гетероструктуры затеняется от возбуждающего излучения и работает как светодиод, в то время как остальная часть работает в режиме холостого хода. Напряжение измеряется в процессе сравнения сигналов ЭЛ исследуемой гетероструктуры и контрольного ФЭ с контактами. Получены аналитические выражения для Q_i (в абс. ед.), а также для коэффициента инжекции $p-n$ -перехода и параметра рекомбинационной компоненты ВАХ с использованием интенсивностей ФЛ и ЭЛ (в отн. ед.).

Описываемая бесконтактная методика измерений может быть применена при совершенствовании приборных структур с $p-n$ -переходом в люминесцирующем материале, например, AlGaAs-гетероструктур светодиодов, биполярных транзисторов и ФЭ различного назначения.

Наиболее широко используемым бесконтактным методом диагностики полупроводниковых материалов и гетероструктур является анализ их люминесцентного излучения при фотовозбуждении. Такое излучение принято называть фотолюминесценцией (ФЛ). Однако если люминесцирующий образец содержит $p-n$ -переход, доступный для фотогенерированных носителей, то часть электронно-дырочных пар будет разделена этим переходом и потеряна для ФЛ излучения. В образце без контактов $p-n$ -переход окажется смещенным в прямом направлении под действием напряжения холостого хода (V_{oc}), при достаточной величине которого появятся инжектированные в квазинейтральные области носители. Связанное с рекомбинацией этих носителей излучение уже с полным основанием можно назвать электролюминесценцией (ЭЛ). Таким образом, люминесцентный сигнал образца с $p-n$ -переходом при фотовозбуждении будет состоять из суммы сигналов ФЛ и ЭЛ.

Интенсивность ЭЛ пропорциональна диффузионной компоненте тока через $p-n$ -переход, которая, в свою очередь, экспоненциально связана с напряжением на $p-n$ -переходе. Однако напряжение зависит еще и от других компонент тока — через глубокие уровни, действующие в обедненной области $p-n$ -перехода, и через локальные утечки, вызванные различного рода дефектами. При выращивании приборных структур каким-либо технологическим методом концентрация глубоких уровней может меняться от процесса к процессу, ухудшая электрические свойства $p-n$ -перехода, однако обычно эти изменения мало влияют на свойства квазинейтральных областей $p-n$ -перехода, если они достаточно сильно легированы. В связи с этим диффузионная компонента тока через $p-n$ -переход может служить как бы опорой для люминесцентной диагностики напряжения на $p-n$ -переходе при сравнении различных образцов. Это обстоятельство было использовано в работе [1] для бесконтактного обнаружения локальных утечек $p-n$ -перехода в гетероструктурах $n-p$ -GaAs- p -AlGaAs, предназначенных для изготовления солнечных фотоэлементов (ФЭ). Здесь для

фотовозбуждения всей светочувствительной поверхности образцов использовалось интенсивное желто-зеленое излучение Hg-лампы. Картина люминесценции фотоактивного слоя p -GaAs содержала сумму сигналов ФЛ и ЭЛ ($\lambda \approx 900$ нм) и наблюдалась визуально с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП). В местах утечек p - n -перехода интенсивность ЭЛ была минимальной. «Утечные» пятна отличались от других потемнений в картине люминесценции тем, что их размеры уменьшались при увеличении освещенности, что связано с изменением падения напряжения на слоевом сопротивлении фронтальной области p - n -перехода (R_c) при перераспределении генерируемого в структуре фототока.

Отметим, что в рассмотренном случае ФЛ и ЭЛ спектрально неразличимы. Однако выделение сигнала ЭЛ возможно при локальном фотовозбуждении

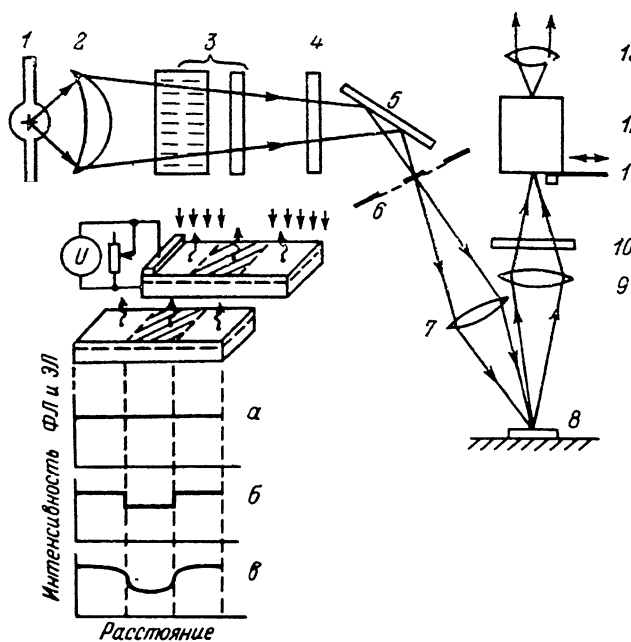


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для осуществления бесконтактной люминесцентной диагностики AlGaAs-гетероструктур солнечных ФЭ.

На вставке — расположение экспериментальных образцов и примеры пространственного распределения интенсивности люминесценции (объяснения в тексте).

образцов [2, 3]. В этом случае освещенная часть образца без контактов работает как фотоэлектрический преобразователь, а затененная часть — как светодиод. Фототок перетекает из освещенной части в затененную. Если последняя довольно протяженна, то возникает падение напряжения на R_c , так что по спаду интенсивности ЭЛ можно оценить величину сопротивления [2]. Если, наоборот, затененная часть мала по размерам, то фронтальная область p - n -перехода остается эквипотенциальной, а сигнал ЭЛ из этой части будет равен сигналу ЭЛ из освещенных частей, тех, где он суммируется с сигналом ФЛ [3].

В настоящей работе на примере солнечных ФЭ с гетероструктурой n - p -GaAs- p -AlGaAs описывается бесконтактная методика построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) и определения внутреннего коэффициента сбора фотогенерированных носителей (Q_i) по люминесцентным данным (ФЛ и ЭЛ) для гетероструктур с p - n -переходом при фотовозбуждении.

Исследовались гетероструктуры высокоэффективных солнечных ФЭ, выращенные методом жидкофазной эпитаксии и в целом аналогичные описанным в [4]. Все образцы имели контакты — сплошной к подложке n^+ -GaAs и полосковый к фронтальной p -области (к слою p -GaAs или p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As), что позволяло сравнивать результаты, полученные бесконтактными методами, с результатами, полученными из электрических измерений. В свою очередь, электрические измерения ВАХ p - n -перехода образцов проводились по значениям фототока,

соответствующим их значениям U_{xx} в режиме меняющейся освещенности [4], для исключения влияния слоевого и контактного сопротивлений. Значения Q_i с использованием контактов определялись на длине волны излучения He—Ne-лазера (633 нм) методом сравнения фототоков исследуемого образца и калиброванного ФЭ с учетом зеркального и диффузного отражения части лазерного света от фоточувствительной поверхности образца.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для осуществления бесконтактной люминесцентной диагностики AlGaAs-гетероструктур солнечных ФЭ. Свет Hg-лампы ДРКС-500 1 после собирания конденсором 2 селективируется фильтрами 3 таким образом, что остается достаточно коротковолновое, но соответствующее полосе чувствительности исследуемых структур ФЭ излучение с длиной волны $\lambda = 550 - 600$ нм. Пройдя ослабитель 4 и отразившись от зеркала 5, излучение собирается в плоскости экрана 6, который служит вместе с объективом 7 для формирования определенного распределения интенсивности освещения на образце 8. Картина люминесценции образца ($\lambda \approx 900$ нм) проецируется объективом 9 через инфракрасный фильтр 10 на фотокатод ЭОП 12, в плоскости которого расположен фотоприемник 11, осуществляющий фотометрирование. Картина люминесценции и положение фотоприемника контролируются визуально через окуляр 13.

Использовалось равномерное освещение образцов с затенением части поверхности в виде резкой полосы шириной 1—2 мм (см. вставку на рис. 1). При этом наблюдались три типа распределений интенсивности люминесценции (а, б и в на вставке к рис. 1).

На распределении типа а затененная полоса практически незаметна. Это означает, что ФЛ излучение на освещенных частях образца отсутствует, т. е. все фотогенерированные носители собираются $p-n$ -переходом, а наблюдается только ЭЛ излучение, обусловленное рекомбинацией инжектированных через $p-n$ -переход носителей. Поскольку распределение ЭЛ в пределах затененной полосы равномерно, слоевое сопротивление фронтальной области $p-n$ -перехода себя никак не проявляет. Таким образом, распределение типа а соответствует случаю $Q_i \approx 1$, $R_c \approx 0$.

На распределении типа б в люминесцентном сигнале от освещенных частей образца присутствует ФЛ излучение, что соответствует потерям фотогенерированных носителей до их собирания $p-n$ -переходом. Здесь $Q_i < 1$. Равномерный сигнал ЭЛ в пределах затененной полосы говорит об эквипотенциальности фронтальной области, т. е. $R_c \approx 0$.

Наконец, распределение типа в наблюдается на образцах с $Q_i < 1$ в условиях действия R_c , т. е. при заметной его величине ($R_c > 0$), либо при достаточно большой ширине затененной полосы. По распределению интенсивности ЭЛ может быть оценена величина R_c , используемая в расчетах формы нагрузочной ВАХ ФЭ с контактами [2, 5].

В условиях эквипотенциальности фронтальной области $p-n$ -перехода (распределения типа а и б) может быть построена ВАХ $p-n$ -перехода и определено значение Q_i для образца без контактов.

П о с т р о е н и е В А Х $p-n$ - п е р е х о д а

Для построения ВАХ $p-n$ -перехода рядом с исследуемым образцом в тех же условиях освещения помещается контрольный ФЭ с контактами, подключенный к вольтметру и варьируемому сопротивлению нагрузки (см. вставку на рис. 1). Основное требование к контрольному ФЭ такое, чтобы он имел сходную с исследуемым образцом структуру. Пусть контрольный ФЭ имеет лучшую ВАХ и больший внешний квантовый выход ЭЛ. Измеряя интенсивности ЭЛ в затененных частях обоих образцов, можно добиться их уравнивания путем шунтирования контрольного ФЭ. Получаемое при этом напряжение на контрольном ФЭ (U^*) можно принять за величину U_{xx} в исследуемой гетероструктуре (U_{xx}^*).

Процедура измерения U_{xx} показана на рис. 2. Здесь в качестве примера кривые a^* и a^* изображают вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов в исследуемой гетероструктуре и в контрольном ФЭ в полулогарифмическом мас-

штабе (индексы и κ соответственно). Диффузионная компонента тока (i_{κ}) связана с U_{xx} для каждого из образцов следующим образом:

$$i_{\kappa} = i_{0\kappa} \exp \frac{qU_{xx}}{kT}, \quad (1)$$

где $i_{0\kappa}$ — плотность тока насыщения диффузионной компоненты. В свою очередь интенсивность ЭЛ излучения ($n_{\text{ЭЛ}}$) пропорциональна диффузионной компоненте тока

$$n_{\text{ЭЛ}} = \mathcal{R}i_{\kappa}, \quad (2)$$

где \mathcal{R} — коэффициент, учитывающий величину внутреннего квантового выхода люминесценции (включая безызлучательные потери на гетерогранице и под-

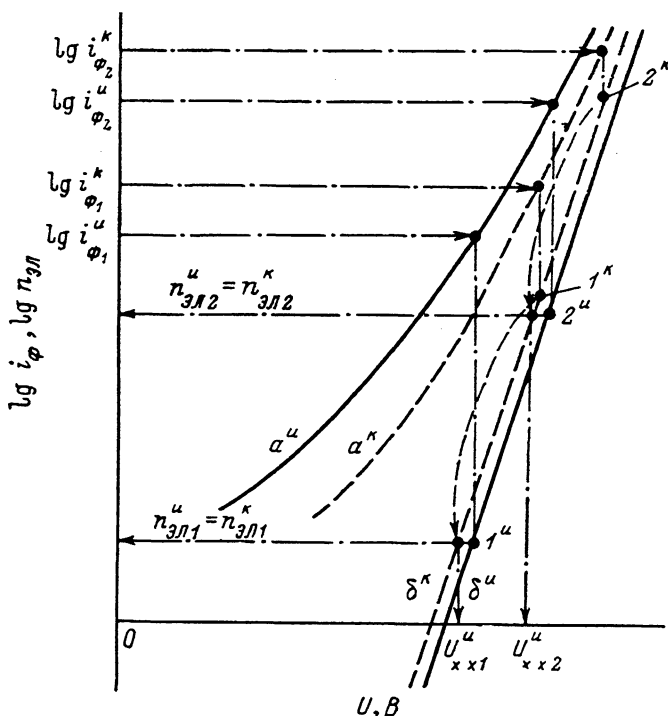


Рис. 2. Порядок определения двух точек ВАХ p - n -перехода.

Кривые a^{κ} и a^u — ВАХ p - n -переходов соответственно исследуемой гетероструктуры и контрольного ФЭ в координатах $\lg i_{\Phi} \rightarrow U_{xx}$; линии b^{κ} и b^u — зависимости $\lg n_{\text{ЭЛ}} = f(U_{xx})$ для тех же образцов.

разумевая условия «низкого» уровня возбуждения), оптические и геометрические факторы, связанные с выводом ЭЛ излучения из гетероструктуры и его регистрацией. Из (1) и (2) можно получить следующее выражение для приращения десятичного логарифма $n_{\text{ЭЛ}}$:

$$\Delta(\lg n_{\text{ЭЛ}}) = 0.434 \frac{q}{kT} \Delta U_{xx},$$

которое означает, что на рис. 2 зависимости $\lg n_{\text{ЭЛ}} = f(U_{xx})$ для исследуемого и контрольного образцов (линии b^{κ} и b^u) представляют собой прямые с одинаковыми наклонами. Расстояние между ними по шкале напряжений не может быть большим, поскольку даже если величины $\mathcal{R}i_{0\kappa}$ для сравниваемых образцов отличаются в 10 раз (что маловероятно для образцов со сходной структурой), то и тогда погрешность оценки U_{xx} методом сравнения сигналов ЭЛ составит ~ 60 мВ.

При некотором малом уровне освещенности в исследуемом и контрольном образцах генерируются фототоки плотностью $i_{\Phi 1}^{\kappa}$ и $i_{\Phi 1}^u$, при которых интенсивности ЭЛ соответствуют ординатам точек I^{κ} и I^u . За счет шунтирования конт-

рольного ФЭ его значение $n_{\text{ЭЛ}}$ снижается до соответствующего значения для образца без контактов на уровне точки I^a и берется отсчет значения U_{xx1}^a . Поскольку плотности фототока исследуемого и контрольного образцов пропорциональны освещенности, они пропорциональны и между собой, т. е. значения фототока контрольного ФЭ могут служить в качестве относительных единиц для исследуемого образца без контактов. Поэтому со значением U_{xx1}^a сопоставляется значение $I_{\Phi 1}^k$ для получения первой точки ВАХ p - n -перехода исследуемого образца со шкалой тока (в отн. ед.). На рис. 2 показаны также построения для второй точки ВАХ, полученные при более сильной освещенности.

Реально для построения нагрузочной ВАХ p - n -перехода образца без контактов необходимо, меняя освещенность, измерять значения фототока контрольного ФЭ и значения его напряжения после уравнивания интенсивностей ЭЛ

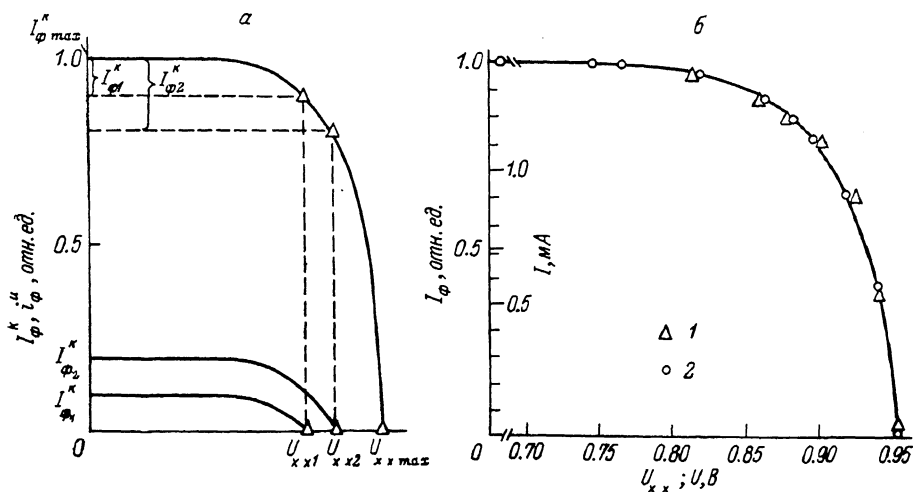


Рис. 3. Порядок построения точек нагрузочной ВАХ p - n -перехода исследуемой гетероструктуры без контактов (а); нагрузочная ВАХ p - n -перехода одного из образцов ФЭ на основе AlGaAs-гетероструктуры: 1 — точки получены с использованием бесконтактного люминесцентного метода, 2 — точки получены из фотоэлектрических измерений с применением контактов (б).

исследуемого и контрольного образцов (рис. 3, а). Именно таким образом были получены точки нагрузочной ВАХ одного из экспериментальных образцов ФЭ (1) на рис. 3, б. На этом же рисунке (2) показаны результаты измерений ВАХ на том же образце с использованием контактов. Видно, что бесконтактные измерения напряжения имеют точность 5—10 мВ. Очевидно, таким способом может быть построена только та часть ВАХ, в которой присутствуют заметная диффузионная компонента тока и заметный сигнал ЭЛ. Практически это имеет место при $U_{xx} \geq 0.8$ В ($T \approx 300$ К).

Определение значения Q_i

Рассмотрим схематический разрез гетероструктуры ФЭ n - p -GaAs- p -AlGaAs (вставка на рис. 4). Будем полагать, что возбуждающее излучение попадает в полосу прозрачности твердого раствора, но полностью поглощается в слое p -GaAs. Полагаем также, что толщина этого слоя меньше диффузионной длины для неосновных носителей — электронов и распределение по толщине как фотогенерированных, так и инжектированных электронов является практически равномерным. Последнее обстоятельство позволяет выразить интенсивность ФЛ ($n_{\text{ФЛ}}$) с помощью выражения, аналогичного (2):

$$n_{\text{ФЛ}} = \mathcal{R}i_n, \quad (3)$$

где i_n — плотность тока потерь, с помощью которого отображается процесс потери фотогенерированных носителей на рекомбинацию в объеме слоя p -GaAs при образовании фототока. Тогда величину коэффициента собирания в расчете

на мощность поглощенного в слое p -GaAs возбуждающего излучения можно записать как

$$Q_i = \frac{i_\phi}{i_\phi + i_n}. \quad (4)$$

В режиме холостого хода фототок преобразуется в темновой ток через p - n -переход, который будем представлять состоящим из двух компонент — диффузионной (1) и рекомбинационной:

$$i_\phi = i_n + i_p, \quad (5)$$

$$i_p = i_{0p} \exp \frac{qU_{xx}}{A_p kT}, \quad (6)$$

где i_{0p} — плотность тока насыщения рекомбинационной компоненты; A_p — параметр рекомбинационной ветви ВАХ. Используя приведенные формулы, можно преобразовать выражение (4) к следующему виду:

$$Q_i = \left(1 + \gamma \frac{n_{\PhiЛ}}{n_{ЭЛ}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\gamma = i_n/i_\phi$ — коэффициент инжекции p - n -перехода. Это выражение позволяет получить нижний предел значения Q_i (в абс. ед.), используя люминесцентные данные в отн. ед. Поскольку $\gamma \leq 1$, $Q_i \geq n_{ЭЛ}/(n_{\PhiЛ} + n_{ЭЛ})$. Верным признаком реализации близкого к предельному значения $Q_i \simeq 1$ будет получение в эксперименте соотношения $n_{\PhiЛ} \ll n_{ЭЛ}$, т. е. распределения интенсивности люминесценции типа a на рис. 1.

Для исключения из (7) величины γ следует рассмотреть функциональную зависимость между $n_{\PhiЛ}$ и $n_{ЭЛ}$, проявляющуюся в режиме меняющейся освещенности. Введем обозначения

$$C \equiv \frac{n_{\PhiЛ}}{n_{ЭЛ}}, \quad D \equiv \frac{dn_{\PhiЛ}}{dn_{ЭЛ}}. \quad (8)$$

Используя предыдущие выражения и, в частности, проводя дифференцирование по U_{xx} , можно получить

$$\gamma = \frac{1}{A_p - 1} \left(\frac{A_p D}{C} - 1 \right). \quad (9)$$

Полагая далее, что две неизвестные величины Q_i и A_p не зависят от освещенности (плотности фототока), и имея значения C и D для двух различных освещенностей, меньшей (C_1, D_1) и большей (C_2, D_2), получим для A_p

$$A_p = \frac{C_1 - C_2}{D_1 - D_2} \quad (10)$$

и окончательно для Q_i

$$Q_i = \left(1 + \frac{C_2 D_1 - C_1 D_2}{C_2 - C_1 + D_1 - D_2} \right)^{-1}. \quad (11)$$

На практике количественная информация о значениях Q_i по люминесцентным данным получается следующим образом (рис. 4). Вначале снимаются зависимости интенсивностей люминесценции от мощности возбуждающего излучения ($P_{\text{возб}}$): $n_{ЭЛ} = f(P_{\text{возб}})$ на затененном участке гетероструктуры (график a) и $(n_{\PhiЛ} + n_{ЭЛ}) = f(P_{\text{возб}})$ на освещенном участке (график b). После этого становится возможной замена шкалы « $P_{\text{возб}}$ » на шкалу « $n_{\PhiЛ}$ » с подстановкой используемых в данном эксперименте единиц интенсивности люминесценции. Далее график a рассматривается как зависимость $n_{ЭЛ} = f(n_{\PhiЛ})$, в двух точках которой определяются значения вспомогательных параметров C и D [см. формулы (8)]. Значение Q_i рассчитывается по формуле (11). Данные по Q_i для образцов ФЭ с различной толщиной слоя p -GaAs приведены в таблице. Видно, что результаты, полученные бесконтактным методом по люминесцентным данным, позволяют осуществить отбор лучших образцов гетероструктур по параметру Q_i .

Таким образом, в полупроводниковых гетероструктурах с $p-n$ -переходом в люминесцирующем материале при фотовозбуждении возможна бесконтактная диагностика электрических и фотоэлектрических параметров. Это может быть использовано, например, для оценки качества приборных структур с малой глубиной залегания $p-n$ -перехода на технологических стадиях до и после изготовления контактов с целью определения режимов, вносящих наименьший уровень утечек. Такая проблема актуальна для фотоэлектрических приборов с высокой коротковолновой чувствительностью, а также для биполярных транзисторов с тонкой базой. Электролюминесцентные свойства гетероструктур светодиодов также могли бы контролироваться при локальном фотовозбуждении пластин и соответствующем подборе длины волны возбуждающего излучения. Полученные формулы (9) и (10) могут быть использованы для бесконтактной оценки инжектирующих свойств $p-n$ -перехода.

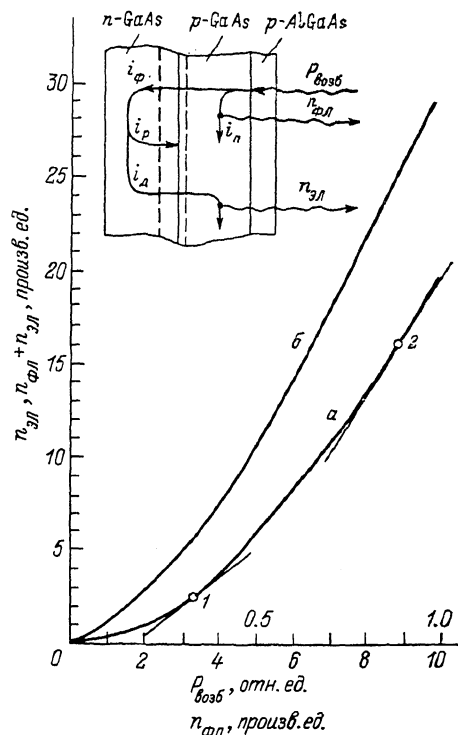


Рис. 4. Зависимости интенсивностей ЭЛ (а) и ФЛ+ЭЛ (б) от мощности возбуждающего излучения в режиме холостого хода для одного из образцов ФЭ на основе AlGaAs-гетероструктуры.

На вставке — схематический разрез гетероструктуры ФЭ ($n-p$) GaAs— p -AlGaAs с обозначением токов при фотовозбуждении в режиме холостого хода.

В наибольшей степени методика подходит для диагностики структур солнечных ФЭ AlGaAs. Здесь бесконтактно может быть оценен весь комплекс параметров, определяющих КПД фотоэлектрического преобразования: напряжение холостого хода, напряжение в точке оптимальной нагрузки, фактор заполнения ВАХ, слоевое сопротивление и, наконец, коэффициент собирания фотогенерированных носителей (в абс. ед.), который в совокупности со спектром фоточувствительности, получаемым из фотолюминесцентных измерений [6], позволяет рассчитать генерируемый фототок. Эти выводы служат основой для качественного визуального контроля совокупности перечисленных параметров по картине люминесценции образцов при фотовозбуждении. Наилучшие параметры будут иметь образцы с наибольшей интенсивностью люминесценции в пределах затененной полосы.

№ образца	Значения Q_i , определенные бесконтактным люминесцентным методом, абс. ед.	Значения Q_i , определенные путем сравнения фототоков с калиброванным ФЭ, абс. ед.
1	0.99	0.88
2	0.93	0.85
3	0.92	0.85
4	0.95	0.86
5	0.80	0.81

Авторы благодарят В. Р. Ларионова, А. А. Алаева и К. Я. Расулова за предоставленные образцы солнечных ФЭ AlGaAs и гетероструктур, а также В. М. Андреева за полезные обсуждения и поддержку в данной работе.

Список литературы

[1] Ларионов В. Р., Попова Т. Б., Румянцев В. Д., Флакс Л. И., Шамухамедов Ш. Ш. // Тез. докл. IV Всес. конф. по физ. процессам в полупроводниковых гетероструктурах. Минск, 1986. Ч. II. С. 220—224.

- [2] Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л., 1989. 310 с.
- [3] Алаев А. А., Гучмазов А. Б., Румянцев В. Д. // Тез. докл. I Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках. Ташкент, 1989. С. 414—415.
- [4] Андреев В. М., Ларионов В. Р., Румянцев В. Д., Федорова О. М., Шамухамедов Ш. Ш. // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 20. С. 1251—1254.
- [5] Rodriguez J.-A., Rumjantzev V. D. // Solar Cells. 1990. V. 28. N 3. P. 241—246.
- [6] Pettit G. D., Woodall J. M., Novel H. J. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35. N 4. P. 335—337.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 24.07.1990
Принята к печати 11.09.1990