

Количественное описание свойств протяженных дефектов в кремнии с помощью тока, наведенного электронным и лазерным пучками

© Я.Л. Шабельникова[†], Е.Б. Якимов, Д.П. Николаев*, М.В. Чукалина

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

* Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, 127051 Москва, Россия

(Получена 27 ноября 2014 г. Принята к печати 4 декабря 2014 г.)

Солнечный элемент на пластине мультикристаллического кремния, содержащего границы зерен, исследовался методом наведенного тока. Было проведено сканирование образца пучком электронов, а также лазерным пучком на двух длинах волн (980 и 635 нм). Зарегистрированные карты наведенного тока были совмещены с помощью специально разработанного кода, что позволило анализировать один и тот же участок границы зерна для трех типов измерений. В результате оптимизации невязки между модельными профилями наведенного тока и экспериментально измеренными были получены количественные оценки характеристик образца и дефекта в нем — диффузионной длины и скорости рекомбинации на границе зерна.

1. Введение

Одним из основных материалов для изготовления солнечных элементов в настоящее время является мультикристаллический кремний (*m*-Si). Он более дешев, чем его монокристаллический аналог, однако и эффективность изготовленных из него элементов ниже из-за неизбежно присутствующих в нем протяженных структурных дефектов (границ зерен, дислокаций). Задача понижения рекомбинационной активности протяженных дефектов для своего решения требует в том числе развития методов локальной диагностики полупроводниковых структур. От диагностического метода требуется не только выявить дефект, но и предоставить количественную информацию об этом дефекте (для границы зерна обычно скорость рекомбинации V_s) и об исследуемом образце в целом (диффузионную длину L или время жизни неосновных носителей заряда). Наиболее естественным шагом было бы определять эти данные с помощью широко используемого метода измерения тока, наведенного электронным пучком (EBIC, electron beam induced current), путем подгонки модельного профиля наведенного тока и экспериментально измеренного. Однако недостатком метода EBIC является то, что электронный пучок проникает в образец неглубоко (на глубину ~ 10 мкм для энергии пучка электронов 20–30 кэВ). Значит, в случае исследования образцов с большой диффузионной длиной профиль наведенного тока слабо зависит от L , что приводит к большой погрешности при определении этой величины. Напротив, для методов тока, наведенного рентгеновским (ХВИС) или лазерным (LBIC) пучками, глубина проникновения пучка в образец обычно велика. Поэтому в настоящей работе предложено метод LBIC использовать вместе с EBIC и определять V_s и L как значения, при которых близки к минимальному значению невязки для обоих методов.

2. Методика измерений

Исследуемый методами EBIC и LBIC солнечный элемент был изготовлен по стандартной технологии на пластине мультикристаллического кремния толщиной 200 мкм и размерами 150×150 мм [1]. Пластина была вырезана из слитка, полученного методом литья. Чтобы уменьшить отражение видимого света, ее поверхность была текстурирована. Исследования методом EBIC проводились на электронном микроскопе JSM 840 при комнатной температуре, энергии пучка 35 кэВ, токе пучка $\sim 10^{-10}$ А. Для измерений методом LBIC была использована установка на основе оптического микроскопа и сканирующего столика [1]. В качестве возбуждающего светового луча использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 980 нм (глубина проникновения ~ 150 мкм [2]) и 635 нм (глубина проникновения ~ 4 мкм [2]). Мощность лазеров составляла 20 мВт. Изображения фрагмента солнечного элемента в режиме наведенного тока (НТ) приведены на рис. 1 (вверху). Границы зерен в *m*-Si являются местами повышенной рекомбинации носителей заряда, поэтому на представленных изображениях они проявляются в виде темных линий.

3. Совмещение изображений, полученных в режиме наведенного тока

Чтобы использовать результаты измерений разными методами для определения искомых характеристик L и V_s , потребовалось решить задачу совмещения трех зарегистрированных в режиме НТ изображений. Изначально было сделано предположение, что существует проективное преобразование, совмещающее каждые два изображения из тройки. Проективное преобразование плоскости имеет восемь параметров и однозначно выражается через координаты любых четырех точек общего

[†] E-mail: janeshabeln@yandex.ru

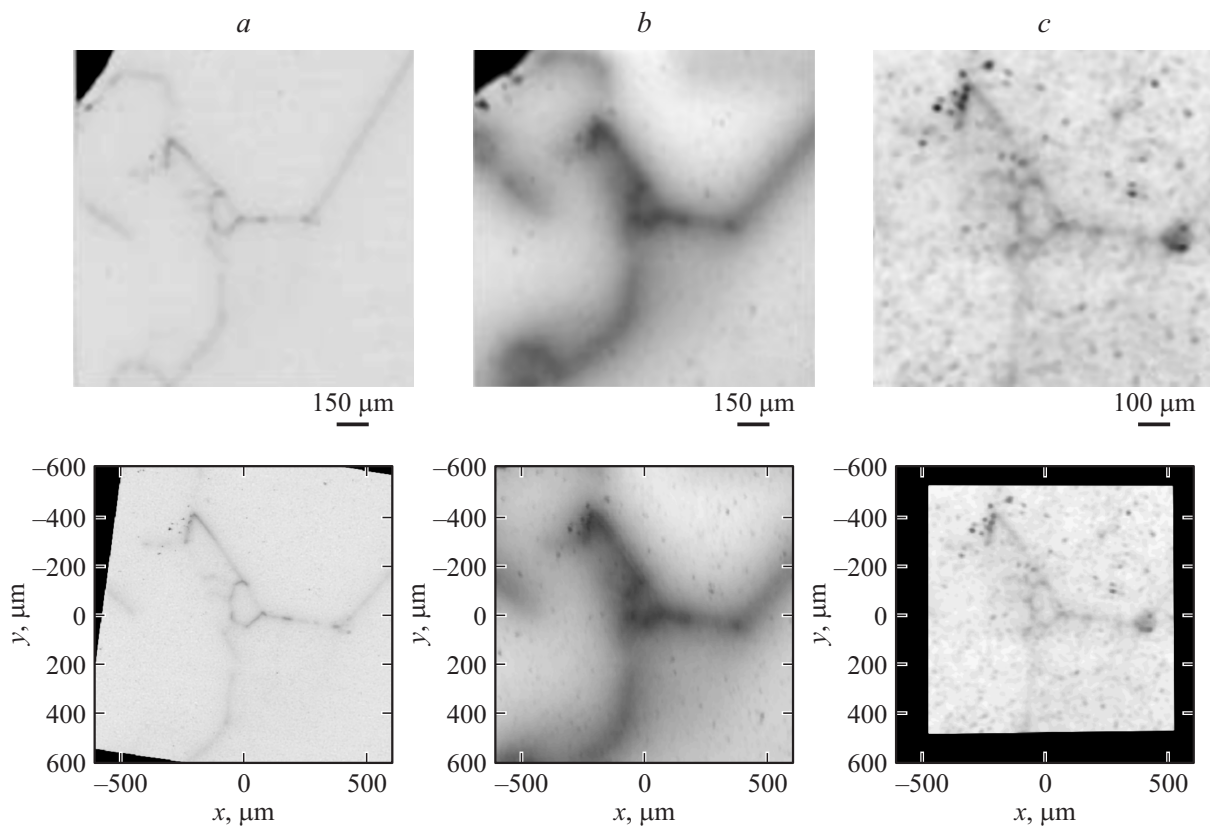


Рис. 1. Вверху — изображения фрагмента солнечного элемента в режиме EBIC (a) и LBIC при возбуждении с длиной волны 980 нм (b), 635 нм (c). Внизу — соответствующие изображения в координатах x, y после процедуры совмещения.

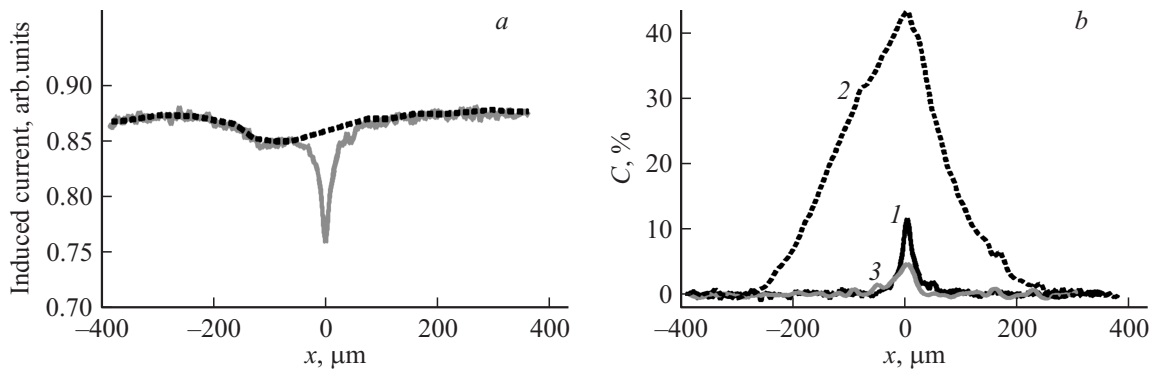


Рис. 2. a — профиль наведенного тока, проходящий поперек границы зерна для метода EBIC. b — контраст наведенного тока от границы зерна для измерений методами EBIC (1) и LBIC на длинах волн 980 (2), 635 нм (3).

положения, если координаты каждой точки известны на обоих изображениях. На данной тройке изображений удалось найти четверку точек, однозначно идентифицируемых на всех изображениях, что и позволило вычислить параметры преобразования. При этом другие хорошо идентифицируемые детали тоже оказались совмещены, что подтверждает исходную гипотезу о виде преобразования.

Результаты совмещения изображений показаны на рис. 1 (внизу). Там же линией отмечен участок границы зерна, где был выбран анализируемый профиль

наведенного тока $I_c(x)$. Для метода EBIC этот профиль показан на рис. 2, a. Контраст наведенного тока определялся как $C(x) = 1 - I_c(x)/I(x)$, где $I(x)$ — наведенный ток, величина которого не связана с влиянием границы зерна, иными словами, бездефектный ток. Он был аппроксимирован кривой, которая показана пунктиром на рис. 2, a. На рис. 2, b представлены профили контраста. Наибольший контраст соответствует случаю метода LBIC и длины волн 980 нм, для которого максимальна глубина проникновения сканирующего пучка.

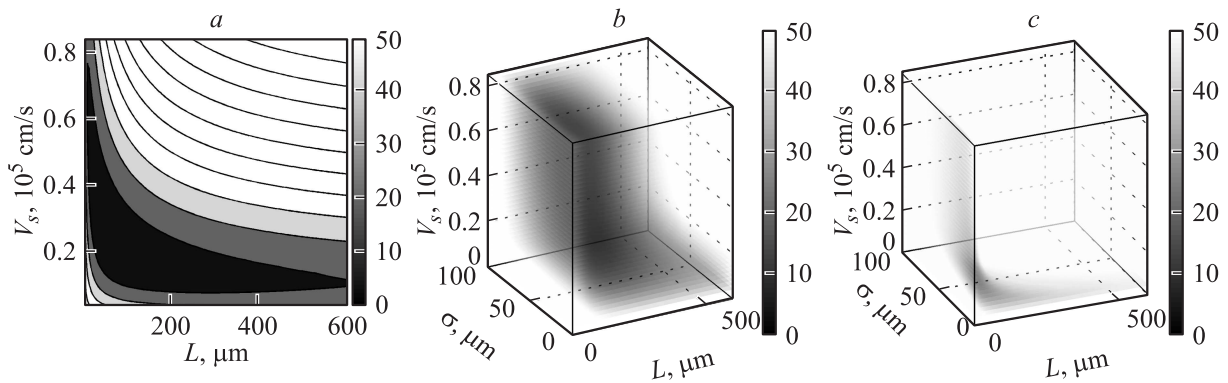


Рис. 3. Результат расчета невязки для профилей контраста, измеренных электронным (а) и лазерными пучками при 980 (б), 635 нм (с).

4. Модель расчета контраста

Моделирование наведенного тока проводилось аналогично расчетам, описанным в [3,4]. Величина наведенного тока рассчитывалась как свертка функции генерации электронно-дырочных пар, $g(x, y, z)$, и вероятности собирания, $\psi(x, y, z)$ [5]. Вероятность собирания задавалась соотношением, полученным Донолато [6], для случая присутствия в образце перпендикулярной поверхности границы зерна. Для метода LBIC использовалось приближение пропорциональной интенсивности лазерного пучка функции генерации [7], т.е. $g(x, y, z) = \exp(-Mz) \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma^2]$, где σ — ширина пучка, M — коэффициент поглощения фотонов, т.е. величина, определяющая глубину проникновения. В случае метода EBIC для описания функции генерации использовалась модель Вернера [8]. В отличие от часто используемой модели Донолато [9], она учитывает влияние обратно рассеянных электронов. Контраст рассчитывался как $C = 1 - I_c/I$, где I — наведенный ток в образце без дефекта.

5. Определение диффузионной длины и скорости рекомбинации

Для представленных на рис. 2 профилей контраста, полученных в результате измерений методами EBIC и LBIC с $\lambda = 980, 635$ нм, были рассчитаны функции-невязки

$$\text{Nev} = \frac{\int dx (C_{\text{ex}} - C_m)^2}{\int dx C_{\text{ex}}^2} \cdot 100\%$$

между экспериментальным (C_{ex}) и модельным (C_m) контрастом. Моделирование проводилось для значений ширины области пространственного заряда (ОПЗ) $W = 0.1$ мкм и коэффициента диффузии $D = 36$ см²/с. При расчете EBIC-контраста объем генерации определяла транспортная длина $s_0 = 13.3$ мкм, соответствующая энергии электронов 35 кэВ, ширина электронного зонда оценивалась как $d = 10$ нм. Для метода LBIC был задан коэффициент поглощения фотонов $M = 67 \cdot 10^{-4}$ мкм⁻¹ для длины волны 980 нм и $M = 0.25$ мкм⁻¹ для 635 нм,

что соответствует глубинам поглощения в [2]. Невязка рассчитывалась в зависимости от диффузионной длины L и скорости рекомбинации V_s . В случае метода LBIC третьим варьируемым параметром была ширина лазерного пучка σ . На рис. 3 показаны результаты расчета невязок: функция Nev_EBIC для контраста EBIC, Nev_LBIC_980 и Nev_LBIC_635 для LBIC и длин волн 980, 635 нм. По представленным изображениям видно, что поверхности уровня функций-невязок — вытянутые и имеют форму, сильно отличающуюся от сферической. С такими функциями плохо работают традиционные методы оптимизации, такие как покординатный спуск или метод случайного поиска. Поэтому нахождение их минимумов было организовано как поиск наименьшего элемента в массиве значений функции-невязки. Значения функций были рассчитаны для L от 4 до 604 мкм и σ от 4 до 100 мкм с шагом 4 мкм, а также с шагом $0.02 \cdot 10^5$ см/с в диапазоне $V_s = (0.04 - 0.84) \cdot 10^5$ см/с. Параметры L , V_s и σ , при которых невязки достигают минимума, представлены в табл. 1, а на рис. 4 показаны рассчитанные для этих значений профили контраста в сравнении с экспериментальными кривыми.

Для Nev_LBIC_980 минимум был найден при $V_s = 0.84 \cdot 10^5$ см/с, что является границей диапазона, в котором рассчитывались значения невязок. Однако дополнительные оценки показали, что эта невязка продолжает медленно убывать с ростом V_s , в частности при $V_s = 10^6$ см/с минимальное значение составляет 4.6%.

Из данных табл. 1 видно, что минимумы невязок находятся в разных точках пространства оптимизируемых

Таблица 1. Значения параметров, при которых невязки достигают минимального значения

Функция-невязка	L , мкм	V_s , 10^5 см/с	σ , мкм	Минимальное значение
Nev_EBIC	68	0.24		5.3%
Nev_LBIC_980	120	0.84	53	4.7%
Nev_LBIC_635	52	0.12	9	14.3%

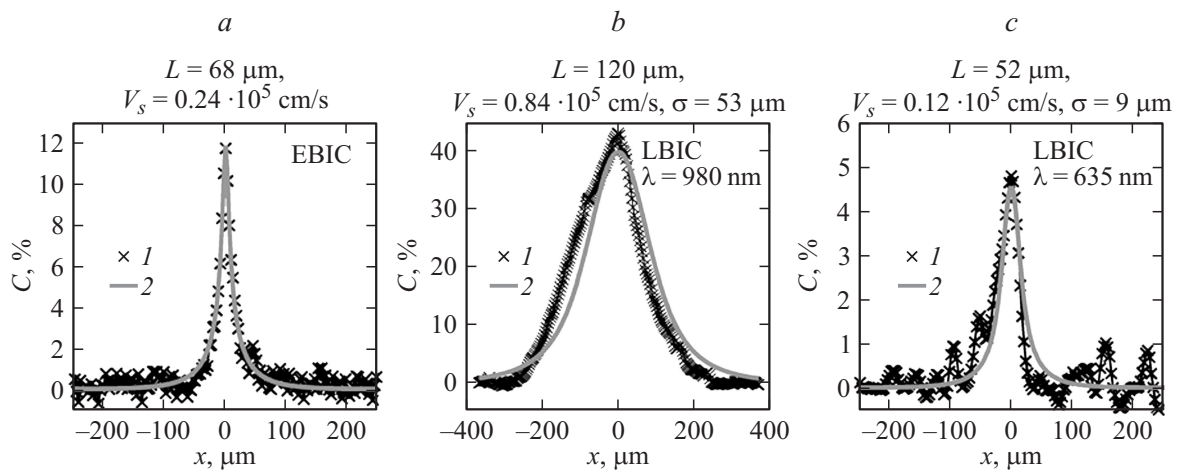


Рис. 4. Экспериментальные (1) и модельные (2) профили контраста, рассчитанные для значений L , V_s и σ , оптимизирующих невязки.

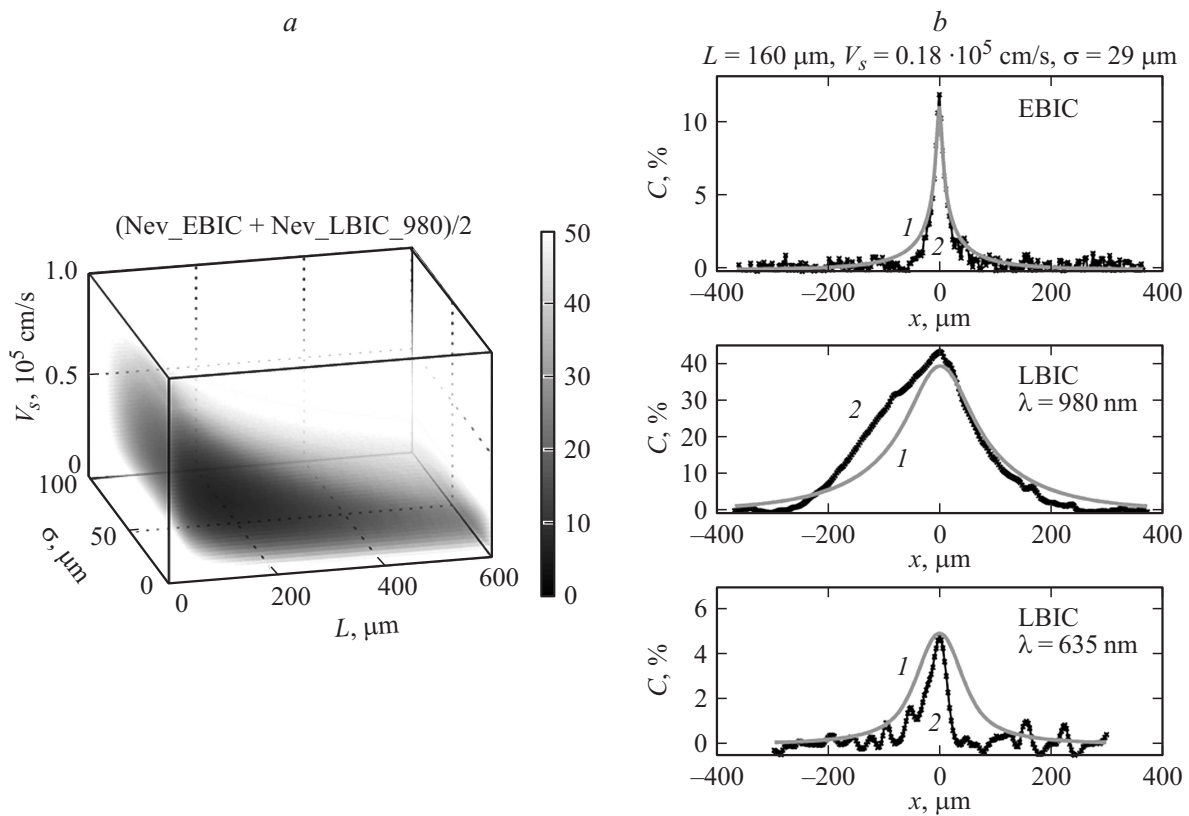


Рис. 5. Функция-невязка S_{12} (a) и профили контраста (b), рассчитанные для минимизирующих эту функцию значений L , V_s , σ (1) в сравнении с экспериментальными кривыми (2).

параметров. Это означает, что результатов измерения одним только методом, EBIC или LBIC, недостаточно для определения диффузионной длины и скорости рекомбинации. Поэтому был поставлен вопрос о поиске параметров, при которых все три невязки близки к минимальному значению.

Была построена суммарная невязка

$$S = (\text{Nev_EBIC} + \text{Nev_LBIC_980} + \text{Nev_LBIC_635})/3,$$

а также полусуммы невязок

$$S_{12} = (\text{Nev_EBIC} + \text{Nev_LBIC_980})/2,$$

$$S_{23} = (\text{Nev_LBIC_980} + \text{Nev_LBIC_635})/2,$$

$$S_{13} = (\text{Nev_EBIC} + \text{Nev_LBIC_635})/2.$$

Координаты и величины минимумов для этих функций приведены в табл. 2. Минимальное значение суммарной

Таблица 2. Параметры, при которых достигают минимального значения суммарные невязки

Суммарная невязка	L , мкм	V_s , 10^5 см/м	σ , мкм	Минимальное значение	Невязка EBIC	Невязка LBIC, 635 нм	Невязка LBIC, 980 нм
S	176	0.08	5	20.8%	22%	26.7%	13.8%
S_{12}	160	0.18	29	7.6%	8.9%	101%	6.2%
S_{23}	220	0.06	5	18.6%	29.6%	23.1%	14.1%
S_{13}	24	0.32	17	15.3%	12.5%	18.2%	69.6%

невязки 20.8%, и значения невязок-слагаемых в точке ее минимума составляют 22, 26.7 и 13.8%. Таким образом, несмотря на протяженную форму минимумов невязок (рис. 3), нельзя найти точку в пространстве параметров $\{L, V_s, \sigma\}$, в которой все три невязки отличались бы от своих минимальных значений менее чем в 3–4 раза.

Кроме того, анализируя данные в табл. 1 и 2, следует отметить, что минимальное значение невязки Nev_LBIC_635 (14.3%) в несколько раз превышает соответствующие значения для двух других невязок (5.3% для Nev_EBIC и 4.7% для Nev_LBIC_980). То же можно сказать о полусуммах невязок LBIC, 635 нм, с EBIC (15.3%) и с LBIC, 980 нм (18.6%). Исходя из этого нужно сделать вывод, что результаты измерений с лазерным пучком 635 нм неинформативны и не должны использоваться для определения диффузионной длины и скорости рекомбинации. Поэтому значения L и V_s нужно находить по минимуму полусуммы невязок S_{12} для EBIC и LBIC, 980 нм. Так были определены значения диффузионной длины 160 мкм, скорости рекомбинации $0.18 \cdot 10^5$ см/с и ширины лазерного пучка 29 мкм. Рассчитанные для этих значений профили контраста показаны на рис. 5, *b*. На части рис. 5, *a* показан вид невязки S_{12} . Можно отметить, что линии уровня этой функции имеют форму гораздо менее вытянутую, чем у невязок, показанных на рис. 3. Это позволяет предположить, что с ней будут хорошо работать методы автоматического поиска минимума.

6. Заключение

Таким образом, в работе изложен способ определения диффузионной длины и скорости рекомбинации на границе зерна с помощью методов наведенного тока. Следует отметить, что результаты измерений методами EBIC и LBIC впервые использовались совместно для определения характеристик образца и дефекта в нем. Показано, что результаты измерений методом LBIC с длиной волны 635 нм, для которого глубина генерации сигнала составляет всего ~ 4 мкм, не могут быть использованы для определения L и V_s .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-07-00970 и 13-02-00021).

Список литературы

- [1] Е.Б. Якимов, В.И. Орлов. Поверхность, № 9, 5 (2014).
- [2] *Properties of Crystalline Silicon*, ed. by R. Hull (London, INSPEC, 1999).
- [3] Я.Л. Шабельникова, Е.Б. Якимов, М.В. Григорьев, Р.Р. Фахртдинов, В.А. Бушуев. Письма ЖТФ, **38** (20), 1 (2012).
- [4] Я.Л. Шабельникова, Е.Б. Якимов. Поверхность, № 11, 27 (2012).
- [5] C. Donolato. Appl. Phys. Lett., **46** (3), 270 (1985).
- [6] C. Donolato. J. Appl. Phys., **54** (3), 1314 (1982).
- [7] T. Wilson, E.M. McCabe. J. Appl. Phys., **61** (1), 191 (1988).
- [8] U. Werner, F. Koch, G. Oelgart. J. Phys. D: Appl. Phys., **21** (1), 116 (1988).
- [9] C. Donolato. Phys. Status Solidi, **65** (2), 649 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Quantitative characterization of extended defects in silicon by means of the electron and laser beam induced current

Ya.L. Shabelnikova, E.B. Yakimov, D.P. Nikolaev*, M.V. Chukalina

Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

* Institute for Information Transition Problems, Russian Academy of Sciences, 127051 Moscow, Russia

Abstract Multicrystalline solar cell containing grain boundaries were investigated by induced current method. The sample was scanned by electron beam and by laser beams with two wavelengths (980 and 635 nm). Induced current maps were aligned by means of specially developed program in order to analyze the same place of grain boundary for three measurements. The minority carrier diffusion length and grain boundary recombination velocity were estimated as a result of minimization of residual between measured and model profiles of induced current contract from grain boundary.