

# Исследование свойств протяженных дефектов в пластически деформированном кремнии методами EBIC и LBIC

© В.И. Орлов\*+, О.В. Феклисова\*, Е.Б. Якимов\*•†

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

† Институт физики твердого тела Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

• Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, 119049 Москва, Россия

(Получена 20 октября 2014 г. Принята к печати 5 ноября 2014 г.)

Проведены сравнительные экспериментальные исследования одномерных и двумерных дефектов в пластически деформированном кремнии методами EBIC и LBIC. Показано, что контраст двумерных дефектов — следов за дислокациями — в методе LBIC может существенно превышать контраст в методе EBIC, что хорошо коррелирует с результатами расчетов. Основной причиной более высокой чувствительности метода LBIC является более глубокое проникновение оптического пучка в материал по сравнению с электронным пучком растрового электронного микроскопа.

## 1. Введение

Методы индуцированного электронным (EBIC) и оптическим (LBIC) пучком тока широко используются для изучения рекомбинационной активности протяженных дефектов в кремнии и структурах на основе кремния. Физическая природа формирования сигнала и полученная в результате измерений информация в этих методах подобны, поэтому их применение в том или ином случае, как правило, достаточно случайно. В то же время качество современного кремния, и даже сравнительно дешевого „солнечного“ кремния, достаточно высокое и чувствительность методов EBIC и LBIC часто недостаточна для выявления всех протяженных дефектов, влияющих на параметры полупроводниковых структур. В связи с этим и возникает задача сравнения чувствительности этих методов и выявления областей, в которых их применение будет наиболее эффективным. Такая задача была проанализирована в [1–3] для метода тока, индуцированного рентгеновским пучком (ХВІС), однако, как показано далее, результаты этих работ применимы и для расчета контраста протяженных дефектов в методе LBIC. Результаты сравнения возможностей методов ХВІС и EBIC в значительной мере применимы и для сравнения возможностей методов EBIC и LBIC. В частности, было показано, что при исследовании двумерных дефектов ХВІС, а значит, и LBIC контраст может существенно превышать контраст в методе EBIC. Однако проблема осложняется тем, что обычно уровень возбуждения в методе LBIC на несколько порядков выше, чем в методе EBIC. В общем случае скорость рекомбинации, а следовательно, и контраст могут существенно зависеть от уровня возбуждения, что не учитывалось в проведенных расчетах. Поэтому представляло интерес сравнить результаты экспериментального исследования

рекомбинационных свойств протяженных дефектов обоими методами в реальных кристаллах кремния.

Настоящая работа посвящена совместному использованию методов EBIC и LBIC для исследования рекомбинационной активности одномерных дефектов — индивидуальных дислокаций и квазидвумерных дефектов — следов за дислокациями (плоскостей, обметенных дислокациями в процессе их движения по кристаллу), для экспериментальной проверки результатов моделирования и выявления преимуществ и недостатков этих методов при исследовании протяженных дефектов.

## 2. Методика

В работе использовались образцы, вырезанные из слитка бездислокационного монокристаллического кремния *p*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Дислокации вводились от локальных концентраторов напряжений („уколы“ алмазным индентором) на грани {100} вдоль линии, параллельной направлению [110]. Далее, образцы деформировались четырехточечным изгибом при температуре 600°С. Дислокации в деформированных образцах выявлялись методом избирательного химического травления. Наряду с дислокациями при травлении выявлялись и следы за дислокациями, которые, как было показано в [4–8], проявляют свойства квазидвумерных дефектов и являются рекомбинационно активными. Это позволило сравнивать EBIC и LBIC изображения как одномерных, так и двумерных дефектов.

Исследования методом EBIC проводились на электронном микроскопе JSM 840 фирмы Jeol при комнатной температуре, энергии пучка 35 кэВ и токе пучка порядка  $10^{-10}$  А. Для получения изображения LBIC нами была изготовлена установка на основе оптического микроскопа и сканирующего столика. В качестве возбуждающего светового луча использовался полупроводниковый лазер

† E-mail: yakimov@iptm.ru

с длиной волны 980 нм (глубина проникновения порядка 150 мкм [9]), мощность лазера составляла 20 мВт. Как обычно, контраст протяженного дефекта рассчитывался как  $C = 1 - I_{cd}/I_{c0}$ , где  $I_{cd}$  — ток, индуцированный при падении пучка на дефект, и  $I_{c0}$  — индуцированный ток вдали от дефекта.

### 3. Результаты и обсуждение

Прежде всего отметим, что, как показано в [10], пространственное распределение скорости генерации неравновесных носителей заряда в методе ХВИС можно описать зависимостью  $g(r, z) \sim \exp(-r^2/\sigma^2) \exp(-\mu z)$ , где  $r$  — расстояние от точки падения пучка,  $z$  — глубина,  $\sigma$  — эффективная ширина пучка и  $\mu$  — коэффициент поглощения. Пространственное распределение скорости генерации неравновесных носителей заряда в методе ЛВИС может быть описано подобной же зависимостью [11]. Поэтому все результаты, полученные в [1–3], применимы и для метода ЛВИС, естественно, с учетом эффективной ширины пучка и коэффициента поглощения, зависящего от длины волны лазера. В частности, в [1–3] было показано, что для двумерных дефектов, а в ряде случаев и для одномерных, в кристаллах с большой диффузионной длиной и малым  $\mu$  контраст в методе ЛВИС может существенно превышать ЕВИС контраст даже при достаточно больших ( $\sim 10$  мкм) значениях  $\sigma$ . Это означает, что метод ЛВИС позволяет выявлять дефекты с более низкой рекомбинационной активностью, чем метод ЕВИС. Поскольку этот вывод является весьма важным для исследования свойств протяженных дефектов в кремнии, одной из основных целей работы являлась его экспериментальная проверка.

В качестве примера на рис. 1, *a* и *b* показаны изображения области деформированного кристалла, полученные методами ЕВИС и ЛВИС соответственно. На ЕВИС изображении наблюдаются лишь следы за дислокациями в виде темных линий и только в некоторых местах на концах этих линий удается выявить более темные точки — места выхода дислокаций на поверхность. На ЛВИС изображении, помимо следов за дислокациями в виде темных линий, также хорошо выявляются места выхода дислокаций на поверхность (показаны стрелками). Более того, поскольку дислокации наклонены к поверхности, а при использовании лазера с длиной волны 980 нм глубина проникновения света превышает 100 мкм, хорошо видны проекции линий дислокаций на поверхность, что позволяет определить действующие плоскости скольжения. На рис. 2 приведены профили контраста следа за дислокацией для обоих методов, измеренные вдоль показанных на рисунке светлых линий. Видно, что величина контраста от двумерного дефекта в методе ЛВИС более чем в 2 раза превышает величину контраста в методе ЕВИС, что согласуется с расчетами. Большая ширина ЛВИС профиля контраста связана как с большей шириной пучка, так и с тем,

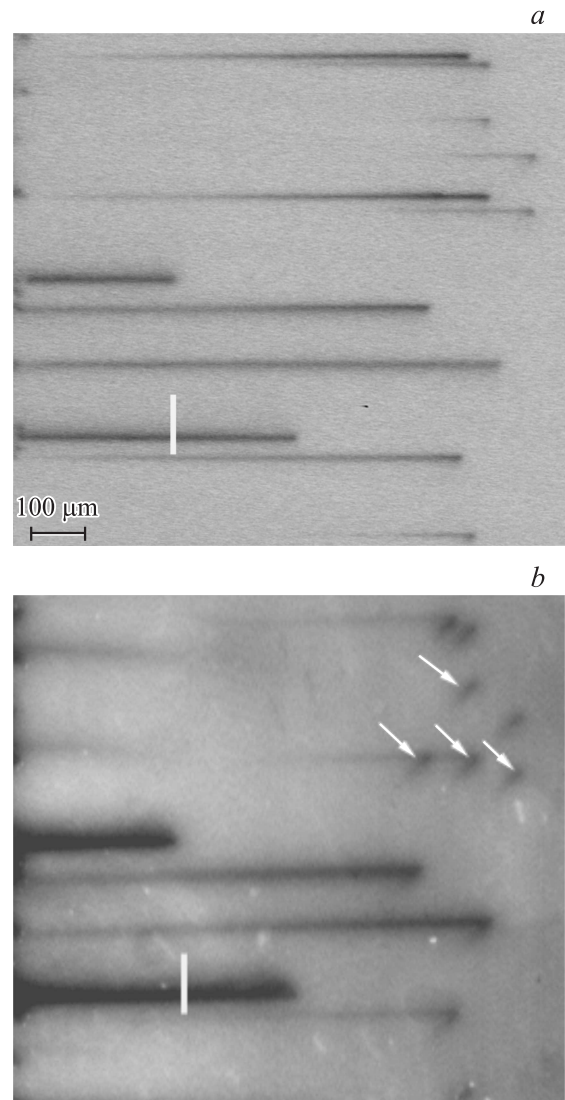


Рис. 1. Изображения деформированного образца, полученные методами ЕВИС (*a*) и ЛВИС (*b*) (длина волны лазера 980 нм).

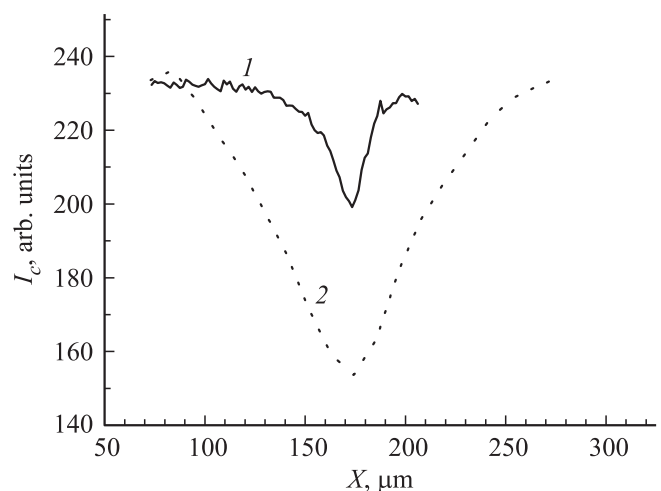


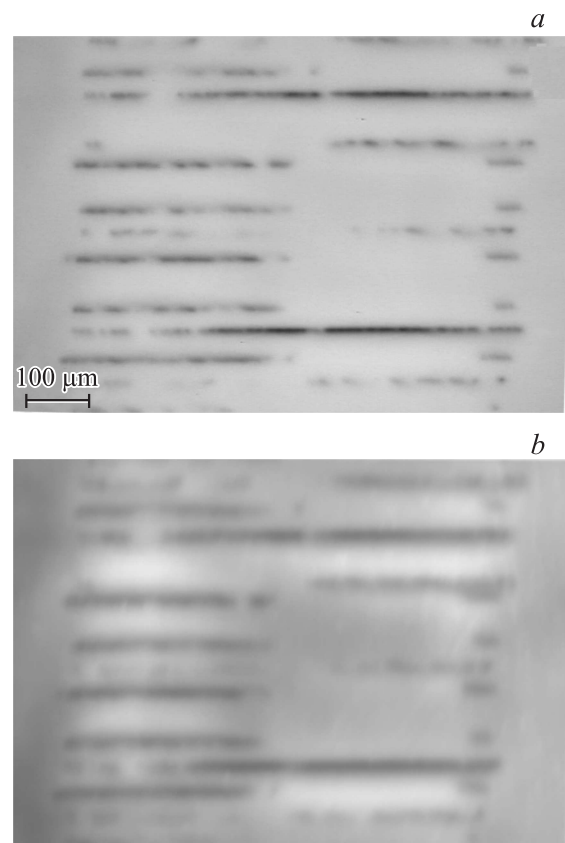
Рис. 2. Профили распределения тока вдоль линий, показанных на рис. 1, *a* и *b* белым цветом.

что плоскость скольжения наклонена к поверхности и ее изображение в методе LBIC в общем случае является проекцией наклонной плоскости.

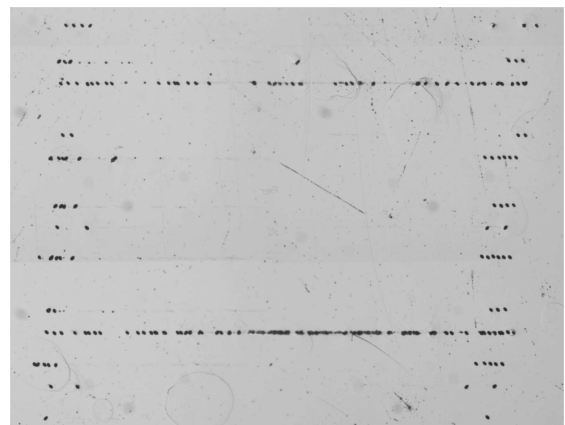
Поскольку, как показано в [1–3], соотношение значений контраста дефектов в методах EBIC и LBIC зависит не только от ширины пучка, но и от диффузионной длины и от ширины области пространственного заряда (ОПЗ), в разных образцах это соотношение может изменяться. Так, на рис. 3 приведены изображения деформированного участка другого кристалла, загрязненного после деформации медью, полученные методами EBIC (а) и LBIC (b) соответственно. Сопоставление с оптическим изображением образца после его химического травления (рис. 4) показывает, что на этом кристалле хорошо видны отдельные дислокации, что позволяет измерить их контраст. Более того, поскольку на этом образце дислокации выявляются обоими методами, это позволяет провести сравнение их контрастов. Как показали измерения, LBIC контраст дислокаций несколько выше, чем EBIC контраст, хотя для некоторых дислокаций это отличие невелико. И для всех дислокаций различие значений LBIC и EBIC контраста дислокаций было меньше, чем различие контрастов двумерных следов за дислокациями на рис. 2.

Различие значений контраста протяженных дефектов в методах LBIC и EBIC определяется большей глубиной проникновения света на длине волны 980 нм по сравнению с глубиной проникновения электронов. При этом следует учесть, что часть протяженного дефекта, находящаяся внутри ОПЗ, не дает вклад в формирование контраста, а глубина области сбора неравновесных носителей заряда (области формирования сигналов в методах EBIC и LBIC) определяется меньшей из величин диффузионной длины и глубины проникновения источника возбуждения. Поэтому в методе EBIC влияние ОПЗ на уменьшение контраста более существенно, чем в методе LBIC при использовании оптического излучения с достаточно большой глубиной проникновения. Этим и определяются более высокие значения контраста протяженных дефектов в методе LBIC. Качественно, эти результаты хорошо согласуются с расчетами, проведенными в [1–3]. Следует отметить, что в [1–3] расчеты проводились для дефектов, перпендикулярных поверхности, в то время как в настоящей работе и дислокации, и следы за дислокациями расположены в плоскостях {111}, наклонных к верхней грани {100}. Как было показано в [12], в методе EBIC это не очень существенно, вследствие того что ширина области генерации неравновесных носителей заряда сравнима с глубиной проникновения электронов, а значит, и с размером проекции наклонного протяженного дефекта. В методе LBIC это не так и влияние наклона должно быть более существенным. Поэтому для количественного сопоставления необходимо провести расчеты контраста с учетом этого обстоятельства.

Как уже отмечалось выше, скорость рекомбинации может существенно зависеть от уровня возбуждения,



**Рис. 3.** Изображения деформированного и насыщенного медью образца, полученные методами EBIC (а), LBIC (b) (длина волны лазера 980 нм).



**Рис. 4.** Изображение образца, представленного на рис. 3, в оптическом микроскопе после селективного химического травления.

особенно в случае заряженных протяженных дефектов, какими являются следы за дислокациями [4,13]. Это должно приводить к сильной зависимости рекомбинационной активности дефекта от интенсивности возбуждения уже при очень малых уровнях возбуждения, в результате чего эффективная скорость рекомбинации

должна существенно понижаться при увеличении уровня возбуждения. И соответственно это должно было бы приводить к понижению LBIC контраста по сравнению с контрастом в режиме EBIC, что экспериментально не наблюдалось. По нашему мнению, это можно объяснить, принимая во внимание, что барьер вблизи заряженных следов за дислокациями может подавляться уже в растворе электронном микроскопе при EBIC измерениях. Значительное изменение рекомбинационных свойств с повышением уровня возбуждения, как это наблюдается в случае точечных дефектов, для протяженных дефектов мало вероятно. Действительно, изменение рекомбинационных свойств точечных дефектов определяется изменением их зарядового состояния, что трудно ожидать для протяженных дефектов, поскольку их заряд приводит к формированию барьера для соответствующих носителей заряда, и в результате при достаточно больших уровнях возбуждения суммарный заряд протяженных дефектов будет определяться только соотношением сечений захвата электронов и дырок и будет близок к нулю.

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе проведены сравнительные экспериментальные исследования одномерных и двумерных дефектов в пластически деформированном кремнии методами EBIC и LBIC. Показано, что контраст протяженных дефектов в методе LBIC действительно, как и предсказывают расчеты, может существенно превышать контраст в методе EBIC. Таким образом, при исследовании двумерных дефектов с низкой рекомбинационной активностью метод LBIC является более эффективным, особенно в кристаллах с большой диффузионной длиной и при использовании слабо поглощаемого света.

Работа выполнена при софинансировании РФФИ в рамках научного проекта 13-02-00021А в части пластической деформации, подготовки образцов и их экспериментального исследования методами LBIC и EBIC и Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ „МИСиС“ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг. (№ К2-2014-055) в части обсуждения полученных результатов и их сравнения с результатами расчетов (Е.Б. Якимов).

#### Список литературы

- [1] Е.Б. Якимов. Поверхность, № 9, 10 (2010).
- [2] Я.Л. Шабельникова, Е.Б. Якимов, М.В. Григорьев, Р.Р. Фахртдинов, В.А. Бушуев. Письма ЖТФ, **38**, 1 (2012).
- [3] Я.Л. Шабельникова, Е.Б. Якимов. Поверхность, № 11, 27 (2012).
- [4] I.E. Bondarenko, V.G. Eremenko, B.Ya. Farber, V.I. Nikitenko, E.B. Yakimov. Phys. Status Solidi A, **68**, 53 (1981).
- [5] O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, N. Yarykin. Physica B, **340–342**, 1005 (2003).
- [6] V.G. Eremenko, E.B. Yakimov. Eur. Phys. J. Appl. Phys., **27**, 349 (2004).
- [7] O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, N. Yarykin, B. Pichaud. J. Phys.: Condens. Matter, **16**, S201 (2004).
- [8] V. Eremenko, E. Yakimov, N. Abrosimov. Phys. Status Solidi C, **4**, 3100 (2007).
- [9] R. Hull (ed.). Properties of Crystalline Silicon (London, INSPEC: IEE, 1999), p. 1042.
- [10] Я.Л. Шабельникова, Е.Б. Якимов. Поверхность, № 9, 53 (2013).
- [11] T. Wilson, E.M. McCabe. J. Appl. Phys. **61**, 191 (1987).
- [12] V.V. Sirotkin, E.B. Yakimov. Solid State Phenomena, **78–79**, ed. by H. Tokamaga, T. Sekiguchi (Scitech Publ., Zuerich-Uetikon, Switzerland, 2001) p. 73.
- [13] В.Г. Еременко, В.И. Никитенко, Е.Б. Якимов. Письма в ЖЭТФ, **26**, 72 (1977).

Редактор Т.А. Полянская

#### Investigation of extended defects in plastically deformed silicon by the EBIC and LBIC methods

V.I. Orlov<sup>\*+</sup>, O.V. Feklisova<sup>\*</sup>, E.B. Yakimov<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Institute of Microelectronics Technology,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia  
<sup>+</sup> Institute of Solid State Physics,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

<sup>\*\*</sup> National University of Science and Technology MISiS,  
119049 Moscow, Russia

**Abstract** Comparative experimental study of one- and two-dimensional defects in plastically deformed silicon by the EBIC and LBIC methods was carried out. It is shown that the contrast of two-dimensional defects — the traces behind the dislocation in the LBIC method can substantially exceed the EBIC contrast that correlates well with the results of calculations. The main reason for the higher sensitivity of the LBIC method is the deeper penetration of optical beam in comparison with electron beam of the scanning electron microscope.