

05;06;07;12

©1995

## СКАНИРУЮЩАЯ ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ. РЕЖИМ НАВЕДЕННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

*О.В.Астафьев, В.П.Калинушкин, В.А.Юрьев*

Метод малоуглового рассеяния света среднего ИК-диапазона (МУРС) в сочетании с фотовозбуждением носителей тока в исследуемом образце уже многие годы используется для исследования крупномасштабных центров рекомбинации и прилипания в объеме полупроводниковых материалов [1-4]. До недавнего времени, однако, этот метод не применялся для регистрации и исследования подобных дефектов в приповерхностных слоях полупроводников, хотя его перспективность как для исследования приповерхностных областей и границ раздела полупроводниковых материалов, так и для неразрушающего контроля рабочих слоев технологических полупроводниковых подложек и изучения рекомбинационно-активных дефектов (КРАД) непосредственно в рабочих слоях полупроводниковых подложек очевидна: он, в отличие, скажем, от РЭМ в режиме наведенного тока, не требует практически никакой предварительной подготовки поверхностей подложек (единственное требование, предъявляемое этим методом к подложке, — полировка с двух сторон, в то время как значительная часть технологических подложек полируется лишь с одной стороны, — скорее всего может быть снято при использовании методов лазерной гетеродинной микроскопии [5]); с его помощью можно исследовать границы раздела полупроводников и поверхности, покрытые защитными слоями (без удаления покрытий, до стадии металлизации пластины), что, насколько нам известно, не позволяет делать ни один из ныне существующих методов исследования и диагностики материалов. Тем не менее первые работы, демонстрирующие возможность исследования КРАД в приповерхностных слоях полупроводников методом МУРС с поверхностным фотовозбуждением образца на примере монокристаллов германия, были выполнены лишь в самое последнее время [6,7]. Логическим развитием этих работ явилась методика визуализации КРАД, впервые представляе-

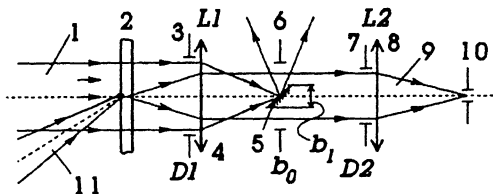


Рис. 1. Наглядная схема инфракрасного сканирующего лазерного темнопольного микроскопа, использованного для визуализации крупномасштабных рекомбинационно-активных дефектов; 1 — зондирующая плоская волна; 2 — исследуемый образец; 3 — диафрагма  $D_1$ , задающая апертуру линзы  $L_1$ ; 4 — линза  $L_1$ ; 5 — “темное поле” диаметром  $b_1$ , установленное в фокусе линзы  $L_1$ ; 6 — диафрагма в плоскости “темного поля” диаметром  $b_0$ ; 7 — диафрагма  $D_2$ , задающая апертуру линзы  $L_2$ ; 8 — линза  $L_2$ ; 9 — волна, рассеянная дефектом или областью неравновесных носителей тока в образце; 10 — приемник ИК-излучения; 11 — сфокусированный лазерный луч, используется в режиме наведенного рассеяния света.

мая в настоящей статье. Базовым инструментом для нее послужил сканирующий лазерный темнопольный микроскоп среднего ИК-диапазона, предложенный для исследования крупномасштабных скоплений электрически активных дефектов в полупроводниках и детально описанный в работах [8–11].

Оптическая схема микроскопа в режиме наведенного рассеяния света (рис. 1) дает достаточно ясное представление об используемом в настоящей работе приборе. Заметим лишь, что в качестве источника света для поверхностного фотовозбуждения использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-215 мощностью 55 мВт, работающий на длине волны 0.63 мкм, модулированное механическим обтюратором излучение которого фокусировалось на поверхности образца в переднем фокусе линзы  $L_1$  в пятно размером около 50 мкм. Несовершенство оптической и механической частей лабораторного прототипа микроскопа не позволило нам добиться оптимальной фокусировки возбуждающего пучка.<sup>1</sup> Тем не

<sup>1</sup> Разрешение микроскопа в режиме наведенного рассеяния определяется размерами области, в которой существуют неравновесные носители тока, т. е. при оптимальной фокусировке возбуждающего пучка размеры светового пятна не должны превосходить нескольких микрометров, а размеры области неравновесных носителей — и разрешение — должны определяться лишь временем жизни и коэффициентом диффузии носителей тока. Кроме того, определенные ограничения на максимальные размеры рассеивающей области — области неравновесных носителей — накладываются и самим темнопольным микроскопом: полоса пропускания пространственно-частотного “пржекторного” фильтра, применяемого в темнопольном микроско-

менее даже имеющийся в нашем распоряжении достаточно несовершенный прибор позволил нам получить первые изображения КРАД в приповерхностных слоях кремниевых пластин и продемонстрировать работоспособность предлагаемого нами метода.

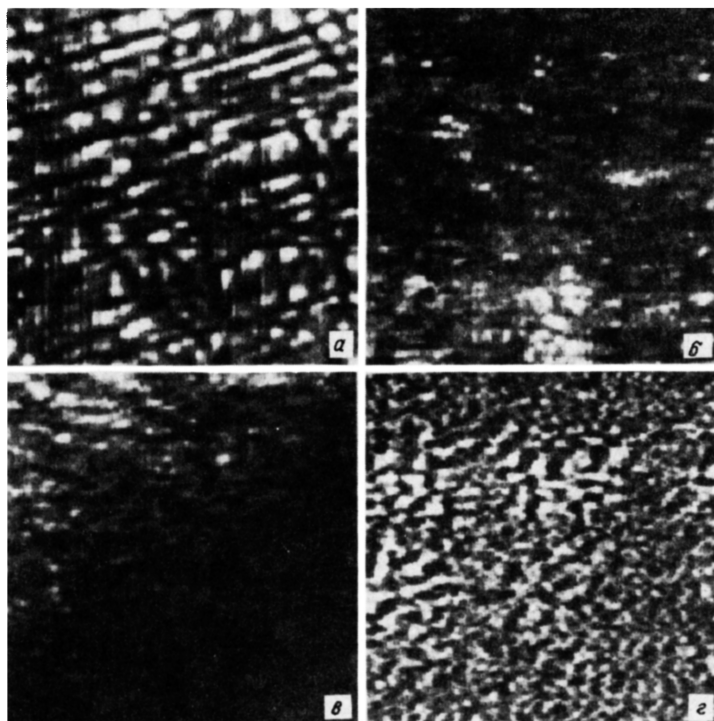
В качестве экспериментальных образцов нами использовались 76-мм пластины монокристаллического Si:P *n*-типа проводимости, выращенного методом бестигельной зонной плавки в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Удельное сопротивление пластин колебалось от 16 до 24 Ом·см. Их толщина составляла  $381 \pm 15$  мкм. Одна сторона пластин была отполирована химико-динамическим способом фирмой-производителем (Wacker), другая их сторона была отполирована механически с оптической точностью в оптической мастерской ИОФ РАН. Кроме того, нами был исследован 76-мм образец Si:P *n*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского в направлении  $\langle 100 \rangle$  (марка КЭФ-4,5), на одной стороне которого был создан слой окисла толщиной 1200 Å (этот образец был взят непосредственно из технологического цикла производства ПЗС-матриц). Противоположная сторона этого образца была отполирована механически с оптической точностью.

При получении изображений КРАД нами использовалось синхронное детектирование на частоте модуляции гелий-неонового лазера (зондирующее излучение CO<sub>2</sub>-лазера при этом не модулировалось). При регистрации изображений тех же областей пластин без фотовозбуждения синхронное детектирование производилось на частоте модуляции зондирующего луча.

На рис. 2, а представлено изображение химико-динамически полированной поверхности одной из пластин, полученное с помощью лазерного микроскопа в режиме наведенного рассеяния света. Та же область пластины, снятая без фотовозбуждения, представлена на рис. 2, б. Средний уровень сигнала на рис. 2, а в 5–7 раз превосходит средний уровень сигнала на рис. 2, б. Контраст изображения (белые пятна) на рис. 2, б связан с крупномасштабными скоплениями электрически активных дефектов (так называемыми слабыми примесными скоплениями, см., например, [4,12,13]), в то время как контраст на рис. 2, а (темные объекты) определяется областями с повышенной скоростью рекомбинации в приповерхностном слое пластины, т. е. КРАД. Видно, что значительная часть КРАД представляет собой следы

---

пе для подавления зондирующего излучения, прошедшего через кристалл, и получения контраста изображения, ограничена снизу, и чувствительность микроскопа при больших размерах рассеивающей области резко падает [8–10].



**Рис. 2.** Изображения участков кремниевой подложки, полученные при помощи лазерного темнопольного микроскопа среднего ИК-диапазона (2×2 мм): *а* — химико-динамическая полировка, режим наведенного рассеяния света; *б* — та же область, режим сканирующего МУРС; *в* — механическая полировка, режим наведенного рассеяния света; *г* — та же область, режим сканирующего МУРС.

парапин. Отметим, что в оптический микроскоп никаких парапин на этой поверхности пластины не видно.

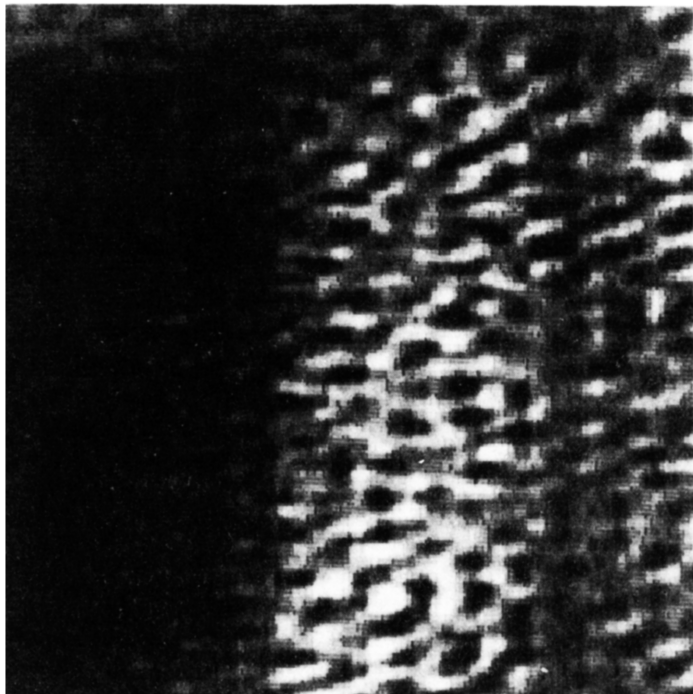
На рис. 2, *в* показано изображение противоположной — механически полированной — поверхности того же образца, а на рис. 2, *г* представлено изображение той же, что и на рис. 2, *в*, области пластины, полученное без фотовозбуждения. Средний уровень сигнала на рис. 2, *б* и *г* примерно одинаков, в то время как средний уровень сигнала на рис. 2, *в* в 10–15 раз ниже, чем на рис. 2, *г*. На рис. 2, *в* отчетливо видно хаотическое нагромождение мелких КРАД в нарушенном механической полировкой приповерхностном слое подложки.

Как и следовало ожидать, на химико-динамически и механически полированных сторонах пластины наблюдаются совершенно различные КРАД.

Заметим, что подобные выводы были сделаны нами ранее из экспериментов по МУРС с поверхностным фотовозбуждением образцов Ge, описанных в работах [6,7]. Отличие результатов [6,7] от данных, приведенных в настоящей работе, состоит в том, что крупные полособразные КРАД, наблюдаемые в настоящей работе на химико-динамически полированной стороне подложек, практически невозможно выявить по диаграммам рассеяния света в стандартном МУРС. Поэтому в [6,7] были зарегистрированы только дефекты, подобные примесным облакам [4,12] (последние, как установлено в [1-4], также являются крупномасштабными центрами рекомбинации). На механически же полированной стороне германиевых образцов, как и в настоящей работе, было зарегистрировано достаточно интенсивное рассеяние света мелкими КРАД в нарушенном приповерхностном слое.

Отметим также, что в настоящей работе и в работах [6,7] применялись разные схемы фотовозбуждения носителей тока в образцах. В настоящей работе, как уже говорилось, неравновесные носители в приповерхностном слое возбуждались сфокусированным световым пучком в квазинепрерывном режиме и источником рассеяния света служила область неравновесных носителей как целое, в то время как в [6,7] фотовозбуждение производилось широким пучком в импульсном режиме и источником рассеяния света служила поверхностная неоднородность распределения концентрации генерируемых внутри светового пятна носителей тока, обусловленная приповерхностными КРАД.

На рис. 3 представлено изображение поверхности кремниевой пластины под слоем окисла. Темные пятна являются изображениями областей с низким временем жизни неравновесных носителей тока. Частые параллельные полосы на картинке — шумы, вносимые в изображение механикой микроскопа. (Мы просим извинения у читателей за сравнительно низкое качество этого изображения. К сожалению, несовершенство механики лабораторного прототипа микроскопа чрезвычайно усложняет получение качественных изображений. Тем не менее дефекты приповерхностного слоя видны на представленной картинке достаточно отчетливо). Подобные дефекты приповерхностного слоя полупроводника непосредственно под слоем окисла, насколько нам известно, до сих пор не наблюдались. Совершенно ясно, что столь сильная неоднородность рекомбинационных свойств приповерхностного слоя должна катастрофическим образом влиять на качество приборов, и в частности ПЗС-матриц, из технологического цикла производства которых взят исследуемый образец.



**Рис. 3.** Изображения крупномасштабных рекомбинационно-активных дефектов, расположенных вблизи поверхности кремниевой подложки, покрытой слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной  $1200 \text{ \AA}$ , полученные при помощи лазерного темнопольного микроскопа среднего ИК-диапазона ( $2 \times 2 \text{ мм}$ ).

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности регистрируемого фотоприемником света  $\text{CO}_2$ -лазера от мощности поглощаемого кристаллом излучения гелий-неонового лазера для химико-динамически 1 и механически 2 полированных сторон кристалла, изображения поверхностей которого приведены на рис. 2. Квадратичная зависимость, полученная на химико-динамически полированной стороне пластины, подтверждает тот факт, что нами регистрируется изображение поверхности в лучах, рассеянных областью неравновесных носителей тока, а рекомбинация линейна (как известно, интенсивность рассеянного света пропорциональна квадрату отклонения диэлектрической проницаемости в рассеивающей неоднородности). Существенно сложнее обстоит дело с механически полированной стороной, на которой получена кубическая зависимость сигнала приемника от мощности фотовозбуждения. Аналогичная зависимость была ранее получена нами для механически полиро-

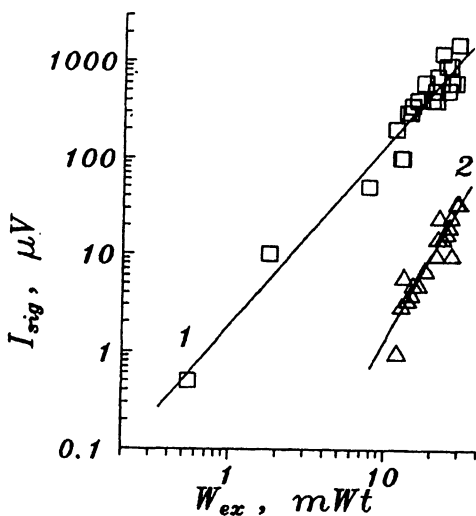


Рис. 4. Зависимости сигнала фотоприемника от мощности поглощенного излучения возбуждающего лазера для химико-динамически (1) и механически (2) полированных поверхностей кремниевой подложки, изображенных на рис. 2.

ванной стороны образца Ge [6,7]. В настоящее время мы не можем дать вразумительное объяснение этим зависимостям. Возможно, кубическая зависимость обусловлена процессами рекомбинации в присутствии большого количества потенциальных барьеров в нарушенном механической полировкой приповерхностном слое образцов [14]. Ясно, однако, что и в этом случае изображение поверхности получается в лучах, рассеянных областью неравновесных носителей.

Итак, в настоящей работе впервые предлагается оптический неразрушающий метод исследования и диагностики крупномасштабных рекомбинационно-активных дефектов в приповерхностных слоях и на границах раздела полупроводниковых материалов. По физическим принципам, лежащим в его основе, описанный метод во многом аналогичен широко используемому в растровой электронной микроскопии методу наведенного тока (ЕВИС), однако в отличие от последнего настоящий метод не требует практически никакой специальной обработки поверхности и создания барье-

ра Шоттки или  $p-n$  перехода. Он позволяет исследовать границы раздела полупроводников и поверхности, покрытые защитными слоями, не требуя при этом удаления покрытий.

Для демонстрации возможностей метода в данной работе впервые получены изображения рекомбинационно-активных дефектов, расположенных вблизи химико-динамически и механически полированных поверхностей монокристалла кремния, без какой-либо предварительной подготовки поверхностей и дефектов, расположенных вблизи поверхности, на которой создан слой окисла, без удаления покрытия и обработки поверхности. Насколько нам известно, подобные изображения не могут быть получены ни одним из ныне существующих методов микроскопии. Зарегистрированные на химико-динамически полированной стороне кристалла и под слоем окисла дефекты, обязанные своим происхождением технологическим обработкам кристаллов, несомненно должны влиять на работоспособность производимых их этих кристаллов приборов.

В заключение следует отметить, что предлагаемый метод легко адаптируется для работы непосредственно в технологической линии производства полупроводниковых приборов и может служить удобным инструментом для контроля качества рабочих слоев.

#### Список литературы

- [1] *Зубов Б.В., Калинушкин В.П., Крынецкий Б.Б., Мишин В.А., Мурина Т.М., Прохоров А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. В. 3. С. 167.
- [2] *Воронков В.В., Воронкова Г.И., Мурина Т.М. и др.* // ФТТ. 1978. Т. 20. С. 1365.
- [3] *Калинушкин В.П., Мушин Д.И., Мурина Т.М., Прохоров А.М., Плоппа М.Г.* // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. В. 6. С. 523.
- [4] *Калинушкин В.П.* // Труды ИОФАН. 1986. Т. 4. С. 3. Engl. transl. in: Proc. Inst. Gen. Phys. Acad. Sci. USSR. 1988. V. 4. P. 1 (N.Y.: Nova).
- [5] *Протопопов В.В., Устинов Н.Д.* // Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука, 1985.
- [6] *Kalinushkin V.P., Murin D.I., Yuryev V.A., Astafiev O.V., Buvaltsev A.I.* // Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Laser Technologies (ALT'93). Prague, Czech Republic, November 8-13, 1993, ed. V. Pustovoy and M. Jelinek. Proc. SPIE. 1994. V. 2332. P. 146.
- [7] *Астафьев О.В., Бувальцев А.И., Калинушкин В.П., Мушин Д.И., Юрьев В.А.* // Поверхность: физика, химия, механика. 1995. № 4.
- [8] *Astafiev O.V., Kalinushkin V.P., Yuryev V.A.* // Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Laser Technologies (ALT'93). Prague, Czech Republic, November 8-13, 1993, ed. V. Pustovoy and M. Jelinek. Proc. SPIE. 1994. 2332. P. 138.
- [9] *Astafiev O.V., Kalinushkin V.P., Yuryev V.A.* // Mater. Sci. Eng. (B). 1995 (submitted for publication).
- [10] *Астафьев О.В., Калинушкин В.П., Юрьев В.А.* // Микроэлектроника. 1995 (в печати).



- [11] Юрьев В.А., Калинушкин В.П., Астафьев О.В. // ФТП. 1995 (в печати).
- [12] Voronkov V.V., Voronkova G.I., Golovina V.N., Zubov B.V., Kalinushkin V.P., Murina T.M., Prokhorov A.M. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 52. P. 939.
- [13] Zabolotskii S.E., Kalinushkin V.P., Murina T.M., Ploppa M.G., Tempelhoff K. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 88. P. 539.
- [14] Зегря Г.Г., Харченко В.А. // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. В. 1. С. 327.

Институт  
общей физики РАН  
Москва

Поступило в Редакцию  
21 февраля 1995 г.

---