

УДК 621.383

Рациональная техническая реализация оптического метода детального картирования кислорода в кремниевых пластинах на базе современных достижений оптоэлектроники

Ю. Р. Винецкий, А. Г. Титов, М. А. Трищенко
ФГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

На основе анализа задачи измерения пространственного распределения кислорода в кремнии разработана и обоснована структурная схема установки. Проведенный поиск элементной базы подтвердил возможность технической реализации метода.

Кремний является основным материалом микроэлектроники. Развитие технологии получения бездислокационных монокристаллов кремния идет по пути увеличения диаметра выращиваемых слитков (до 200 мм). В условиях постоянного роста степени интеграции и снижения размера базового элемента изделий микроэлектроники возрастает значение контроля пространственного распределения кислорода, присутствующего уже в исходном материале.

Кислород в кремнии играет как положительную роль, связанную с внутренним геттерированием, так и отрицательную, связанную с дефектообразованием, ухудшающим характеристики приборов. Наилучшие результаты по внутреннему геттерированию и выходу приборов обеспечиваются в узких диапазонах оптимальных значений концентраций кислорода ([1]: для биполярных микросхем — $(1,7-2,0) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, КМОП — $(1,5-1,65) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, ПЗС — $(1,4-1,6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Видно, что диапазон изменения концентраций чрезвычайно узкий — порядка 10^{17} см^{-3} , и это сразу определяет чувствительность к изменению концентрации кислорода (5%-ная точность измерения обеспечивается при чувствительности порядка 10^{16} см^{-3}).

Реально однородное распределение примеси в объеме кремния трудно достижимо. Для регистрации всех особенностей распределения кислорода требуется аппаратура, обеспечивающая измерение распределения кислорода по площади пластины с субмиллиметровым разрешением, а самых мелких — с разрешением вплоть до 30–50 мкм.

Основным методом определения концентрации кислорода N_{Ox} является инфракрасная спектроскопия [1]. Анализ существующих стандартных методик показывает, что они не могут быть прямо использованы для решения поставленных задач, в первую очередь из-за их низкой локальности (7 мм вместо субмиллиметровой). Непригодны стандартные методики для решения поставленной нами задачи непрерывных локальных измерений и по другой причине — необходимом огромном объеме измерений, поскольку требуют квазинепрерывного измерения спектра пропускания в диапазоне 8–10 мкм. Поэтому необходимо свести измерения к измерению в каждой точке на одной — трех длинах волн.

Задаваясь типичным диапазоном толщин кремниевых пластин (0,3–2 мм), определим параметры, которые намерены реализовать (таблица).

Наименование	Числовое значение	
Диаметр пластины, подлежащей измерениям, $D_{\text{п}}$, мм	200 (max)	
Толщина пластины, подлежащей измерениям, $t_{\text{п}}$, мм	0,3 (min) 1 (mid) 2 (max)	
Локальность измерения концентрации межзельного кислорода (пространственное разрешение), Δr_{Ox} , мкм	30 (min) 50–100 (mid) 100–500 (max)	
Диапазон измерения концентрации межзельного кислорода в пластине, N_{Ox} , см^3	$1 \cdot 10^{17}$ (min) $3 \cdot 10^{18}$ (max)	
Точность измерения, $\Delta N_{\text{Ox min}}$, см^3	$1 \cdot 10^{16}$ (max) (10 % от $N_{\text{Ox min}}$)	
Справочный параметр, см^2 : константа связи коэффициента поглощения с концентрацией N_{Ox} $\alpha = N_{\text{Ox}}/\text{Const 1}$ или Const 2	Const 1	$3,14 \cdot 10^{17}$ (min) [20]
	Const 2	$4,81 \cdot 10^{17}$ (max) [27]

Требования к апертурному углу

Из рис. 1 видно, что при конечной толщине пластины происходит "размытие" информации о значении N_{ox} , обусловленное расходимостью пучка лучей. При $t = 1$ мм и расходимости $\beta' = 0,015:1$ радиус "размазывания" $\Delta_r = 15$ мкм. Соответствующий угол β в воздухе составляет $\beta = n_{Si} \beta' \approx 3^\circ$ ($n_{Si} = 3,412$ — показатель преломления кремния). Этот угол здесь и ниже будем называть критическим углом (КУ).

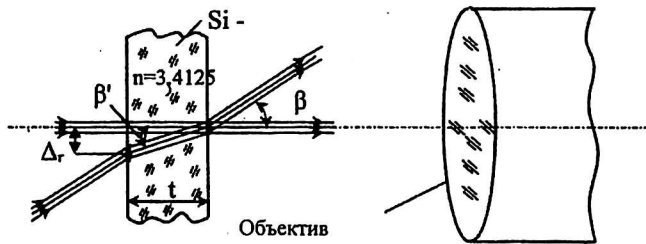


Рис. 1. Толщина пластины (t) и угол раскрытия пучка лучей β , регистрируемый оптикой, определяют величину пространственной "размазки" локального значения концентрации кислорода

Выбор основной оптической схемы

На пути достижения указанных параметров возможны две принципиально различные схемы: схема самосвечения пластины (а) и схема просвечивания (б); различие схем иллюстрируется рис. 2, а.

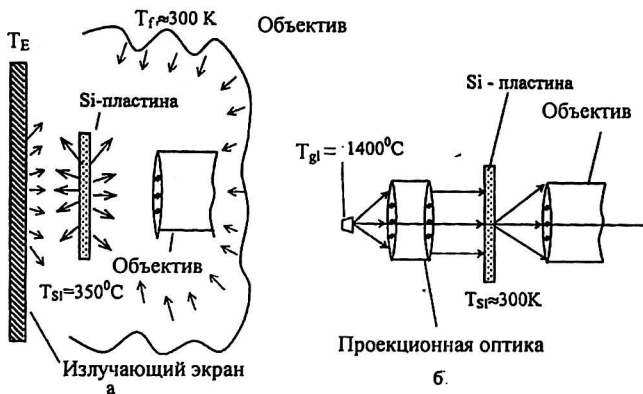


Рис. 2. Оптические схемы:

а — самосвечения пластины; б — просвечивания

Главное преимущество схемы — возможность независимого от объекта выбора и оптимизации источника излучения. Метод самосвечения принципиально более ограничен в возможности получения сигналов достаточной интенсивности, так как температура пластины T_{Si} не может превышать 350—400 °С. Независимый же источник, (например, глобар) может иметь более высокую температуру $T_{gl} = 800$ —1100 °С.

Проведем сравнительный анализ обеих схем. **Чувствительность**, определяемая как отношение приращения спектральной яркости свечения пластины $L(\lambda, T_{Si})$ к приращению поглощения η_E , вызвавшего соответствующие изменения яркости, в схеме (см. рис. 2, б) значительно выше. Итоговые зависимости интенсивности излучения в пределах апертурного угла (КУ) и эффективной спектральной полосы $\Delta\lambda_{ox_ef} = 0,278$ мкм от η_E , учитывающие для схемы (см. рис. 2, а) вклад равномерно излучающего экрана ($T_E \approx 300$ К) и вклад собственного излучения пластины для схемы (см. рис. 2, б), изображены на рис. 3, а. Наклон кривых характеризует чувствительность каждой из схем. Их отношение изображено на рис. 3, б. Из рис. 3 видно, что выигрыш в чувствительности составляет до 4—5 раз при температуре глобара $T_{gl} = 1100$ °С, а при его предельной температуре 1400 °С — возрастает в 5,5—7 раз.

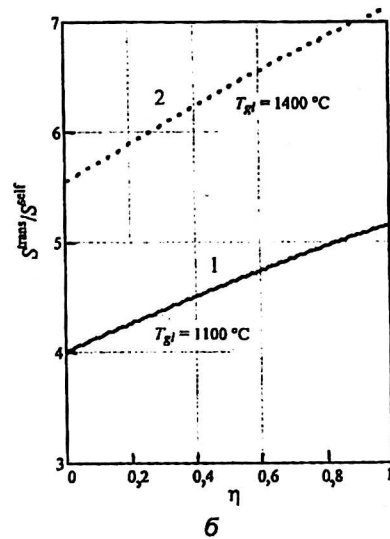
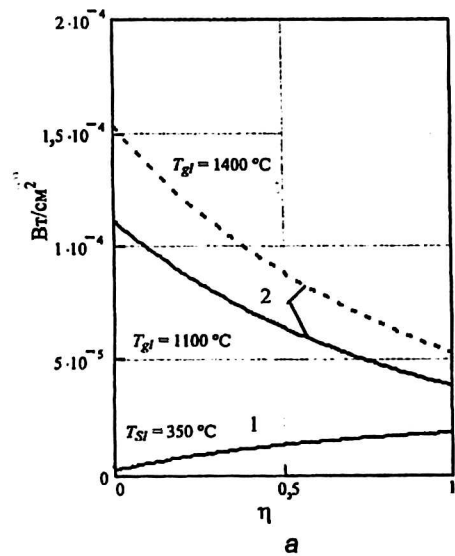


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения оптических схем:

а — плотность мощности излучения для:

1 — схемы самосвечения, 2 — схемы просвечивания;

б — отношение чувствительностей для:

1 — схемы самосвечения $S_{L\eta}^{self}$; 2 — схемы просвечивания $S_{L\eta}^{trans}$

Абсолютные величины сигналов, подлежащих измерению в схеме (см. рис. 3, а), значительно ниже, чем в схеме на рис. 3, б. Значение минимальной подлежащей регистрации величины $\Delta\eta_{\min}$, соответствующей концентрации кислорода $N_{\text{ox_min}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$:

$$\Delta\eta_{\min} = \frac{\Delta N_{\text{ox_min}}}{\text{Const 1}} t_{\text{SI}} = \frac{10^{16} \text{ см}^{-3}}{3,14 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}} \cdot 0,01 \text{ с} = 3,2 \cdot 10^{-3}.$$

Проведенные для схемы (см. рис. 3, а) расчеты (при наиболее благоприятных условиях) показали, что фототок пикселя фотоприемника, отвечающий минимальному инкременту концентрации кислорода, не превысит $3 \cdot 10^{-12} \text{ А}$, что практически совпадает с шумовым током типичного ФП (это делает затруднительной регистрацию сигнала). Соответствующие оценки для схемы (см. рис. 3, б) будут проведены ниже.

Необходимость в схеме (см. рис. 3, а) жесткой стабилизации температур фона и основных источников излучения. Для пластины с толщиной 1 мм и концентрацией кислорода 10^{18} см^{-3} изменение температуры, вызывающее тот же инкремент сигнала, что и минимальное приращение концентрации кислорода $\Delta N_{\text{ox_min}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, для пластины составляет $\approx 0,8 \text{ К}$ и для экрана $\approx 1 \text{ К}$ (в схеме просвечивания та же ошибка, эквивалентная желаемой точности $\Delta N_{\text{ox_min}}$ обеспечивается при стабилизации температуры пластины в пределах $\approx 28 \text{ К}$, а глобара — в пределах $\approx 2,7 \text{ К}$).

Отсутствие фоновой составляющей в варианте на рис. 3, а приводит к невозможности регистрации малых сигналов многоэлементными ФП.

Из работ [2, 3] следует, что все такие приборы подвержены фундаментальному ограничению: при снижении уровня вводимого тока растет инерционность инжекции, так что эффективный ввод слабых сигналов возможен только на фоновом "пьедестале".

Таким образом, схема просвечивания является единственно возможной для разрабатываемого метода.

Оценка возможности реализации желаемых параметров

При последующем анализе максимально жесточим условия оценки ($t_{\text{SI}} = 0,3 \text{ мм}$ и значение константы пересчета — Const 2). Значение $\Delta\eta$ при этом снижается до $6,24 \cdot 10^{-4}$.

Как видно из рис. 4, декремент сигнала за счет приращения концентрации кислорода $N_{\text{ox_min}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляет около 0,04 % от мощности падающего сигнала и около 0,07 % — от мощности выходного сигнала в чистом кремнии. Такова минимальная величина контраста, который необходимо регистрировать; обратная величина представляет собой отношение фоновой составляющей к полезному сигналу, величина которого эквивалентна шуму схемы — отношение фон-шум (ОФШ). Оценку ОФШ можно получить для предела слабого поглощения как

$$\text{ОФШ} = \frac{\tau(\lambda_{m_ox}, \eta_{\Sigma} = 0)}{\left| S_{I_{\eta}}^{\text{trans}}(\eta_{\Sigma} = 0) \right| \frac{\Delta N_{\text{ox_min}}}{\text{Const 2}} t_{w_{\min}}} = \frac{0,54}{0,645 \cdot \frac{10^{16} \text{ см}^{-3}}{4,81 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}} \cdot 0,03 \text{ с}} = 1,34 \cdot 10^3.$$

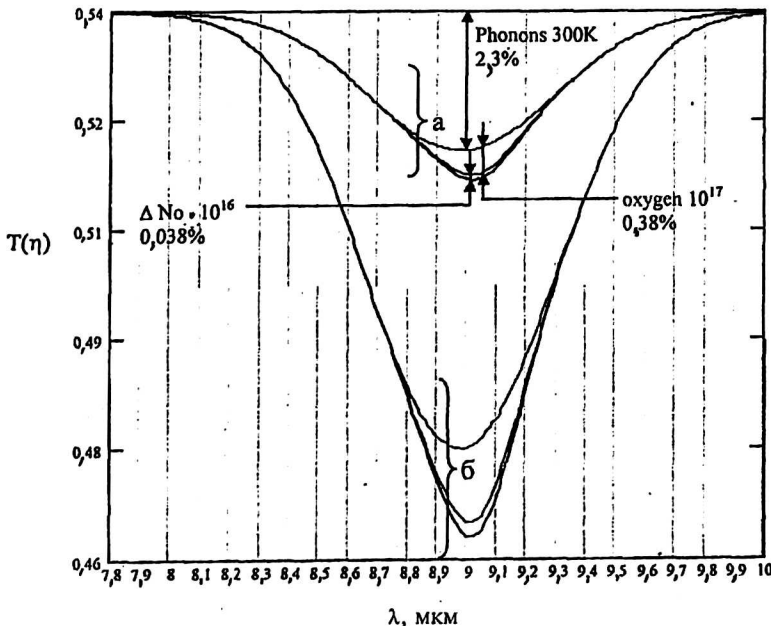


Рис. 4. Спектр пропускания пластины:
а — $t_{\text{SI}} = 0,3 \text{ мм}$, $N_{\text{ox_min}} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
б — $t_{\text{SI}} = 1 \text{ мм}$

Если потребовать от приемного канала также возможности передачи прямого, не ослабленного отражениями сигнала, то соответствующая величина возрастает до 2500 раз.

Идеальный квантовый приемник, работающий в режиме ограничения фоном (BLIP), обладающая зарядовой емкостью ячейки $N_{\max} = 10^7 \bar{e}$, реализует динамический диапазон $DD_{\text{BLIP}} = N_{\max} \approx 3000$. Поскольку зарядовая емкость ячейки типичного квантового приемника (размером пикселя 30×30 мкм) составляет $6,25 \cdot 10^6 - 1,25 \cdot 10^7$ электронов, то все, что необходимо для реализации требуемого динамического диапазона 2500 — это чтобы приемник работал в режиме, близком к BLIP. Проведенные для конкретного ФП расчеты показали, что реальный динамический диапазон уменьшается до значения 2230. Это обусловлено темновыми токами (I_t) фоточувствительных элементов приемника. Рабочие фоновые токи большинства приемников ($10^{-8} - 10^{-7}$ А) по меньшей мере в пять раз превышают уровень, обеспечиваемый при использовании глобара ($2 \cdot 10^{-9}$ А). Переходу на более низкий рабочий уровень фонового тока препятствует вредное влияние I_t .

Таким образом, задача выбора излучателя и приемника сводится:

к согласованию фонового сигнала пропуска с уровнем темнового тока (тремякратное превышение фонового тока над темновым ухудшает обнаружительные параметры не более чем на $\approx 15\%$;

к выбору приемника, близкого к BLIP-режиму и обладающего зарядовой емкостью ячейки не менее 1 пКл.

Выбор приемника излучения

Для диаметра пластины 200 мм, будь-то приемник матричным или линейным, необходимо механическое сканирование. Наличие матрицы лишь усложняет порядок сканирования. Кроме того, более высокая стоимость матрицы делает выбор линейки единственно возможным. В данной задаче предпочтение имеют ВЗН КРТ-линейки для диапазона 8—12 мкм.

Итогом поиска явились гибридные ВЗН-линейки на основе КРТ-диодов и кремниевых КМОП-мультиплексоров фирмы SOFRADIR (Франция) [4]. Выбранные приемники содержат ячейки необходимых размеров (30×30 мкм), обеспечивают удовлетворительный динамический диапазон (в среднем 2500), при этом их рабочие токи лежат в интервале $(1,3 - 2,7) \cdot 10^{-8}$ А, а средний уровень темнового тока для дальнейших оценок может быть принят за $I_t = 0,5 \cdot 10^{-8}$ А.

Таким образом, требования к источнику излучения конкретизируются: его мощность должна обеспечивать ток ячейки приемника $1,5 \cdot 10^{-8}$ при прохождении излучения через чистую от кислорода пластину.

Выбор источника излучения

Требование трехкратного превышения фонового тока над темновым определяет источник излучения с плотностью мощности $2,5$ Вт/см².

Предпринятый нами поиск включал как равновесные, так и лазерные источники. Стабильные линии излучения известных газовых лазеров лежат в области $\lambda > 9,7$ мкм, и среди таких приборов подходящий найти не удалось. Из литературных источников известно об использовании в данной задаче недавно разработанных твердотельных диодных лазеров [5, 6]. В настоящее время группа фирм Laser Components [7] предлагает конструктивно законченные решения для спектроскопии высокого разрешения на базе охлаждаемых *перестраиваемых* диодных лазеров для широкой области ИК-спектра, обладающих необходимой мощностью и другими параметрами, так называемых TLD (фирменное название SRECDILAS-IR).

Основные параметры излучателя, предполагаемого к применению в измерительной установке, представлены ниже.

Параметры излучателя фирмы Laser Components Instrument Group./ Laser Components GmbH

Наименование базового лазера/источник излучения	SRECDILAS IR
Возможность установки центральной длины волны (CWL) в диапазоне 8—10 мкм.....	точное позиционирование
Полная мощность излучения на выходе коллиматора:	
в одномодовом режиме	
P_{out1} , мкВт	до 250
в многомодовом режиме	
P_{outm} , мВт	до 1
Спектральная ширина полосы излучения (FWHM) при $CWL = \lambda_{m_ox}$, мкм, не более.....	10^{-5}
Пределы регулировки CWL с помощью температуры (медленной) при $CWL \approx 9$ мкм, мкм	8—10,2
Пределы регулировки CWL с помощью управляющего тока (быстрой), мкм:	
в одномодовом режиме ΔCWL_1	0,01—0,03
в многомодовом режиме ΔCWL_m	0,033
Диапазон частот модуляции управляющего тока, f_{mod}	DC ..50 кГц, 1 МГц и более
Размеры тела излучения в плоскости, перпендикулярной оси пучка, $L \times H$, мм	0,2x0,2
Угол расходимости пучка излучения перед коллиматором, по уровню 0,5 диаграммы направленности (FWHM), град	50
Фокусное расстояние коллимирующей оптической системы, f , мм	38
Диаметр светового пучка на выходе коллиматора, D , мм	10—14

Плотность мощности в выходном пучке излучателя составляет

$$\frac{P}{S} = \frac{250 \text{ мкВт}}{150 \text{ мм}^2} \approx 0,16 \text{ мВт/см}^2, \text{ что в 15 раз}$$

меньше необходимого уровня.

Учитывая, что необходимая облучаемая площадь пластины (7 мм²) в 20 раз меньше площади пучка излучения источника ($A = \pi D^2/4 \approx 150 \text{ мм}^2$), а расходимость пучка излучения ($\gamma = \frac{(H_{\text{source}}/2)}{F_{\text{source}}} \approx 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,15^\circ$) в 20 раз

меньше КУ, можно "сжать" пучок по одной из осей в 12 раз. При этом плотность мощности возрастет до 2,4 мВт/см², а угол расходимости пучка не превысит КУ. Дополняя излучатель экраном с прямоугольным окном и цилиндрической линзой, мы сформируем на кремниевой пластине равномерную полосу излучения требуемых размеров (7x1 мм) и требуемой мощности.

Таким образом, выбор описанного источника излучения и его дооснащение относительно несложной оптической системой завершает решение задачи принципиальной компоновки оптической системы.

Общая схема измерительной установки

Схема установки изображена рис. 5. Источник излучения располагается в дьюаре 1 и управляется контроллером 2, его излучение направляется на коллимирующее параболическое зеркало 3. Коллимированный луч частично попадает на отклоняющее зеркало 4, формирующее контрольный пучок, воспринимаемый контрольным одноэлементным приемником 5, сигнал которого вводится в компьютер посредством схемы сопряжения 6. Основная часть пучка проходит через проекционную систему 7, проецирующую полосу на кремниевую пластину 8. Пластина располагается на столике микроперемещений 9, управляемом контроллером 10. Излучение, прошедшее пластину, проецируется на ВЗН-приемник на КРТ посредством объектива 11, обеспечивающего увеличение от 1^x до 2^x, с относительным отверстием $\approx F/10$. Длинная сторона ВЗН-приемника, помещаемого в дьюаре 12, расположена в плоскости, перпендикулярной плоскости изображения. Приемник работает в режиме, близком к номинальному (времена накопления — 50–200 мкс, фоновые токи $\approx 10^{-8} \text{ А}$), будучи управляем своим контроллером 13. Выходной сигнал приемника обрабатывается постмультиплексорными схемами и АЦП 14 и после поступает в компьютер 15 для последующей обработки и наблюдения на мониторе 16.

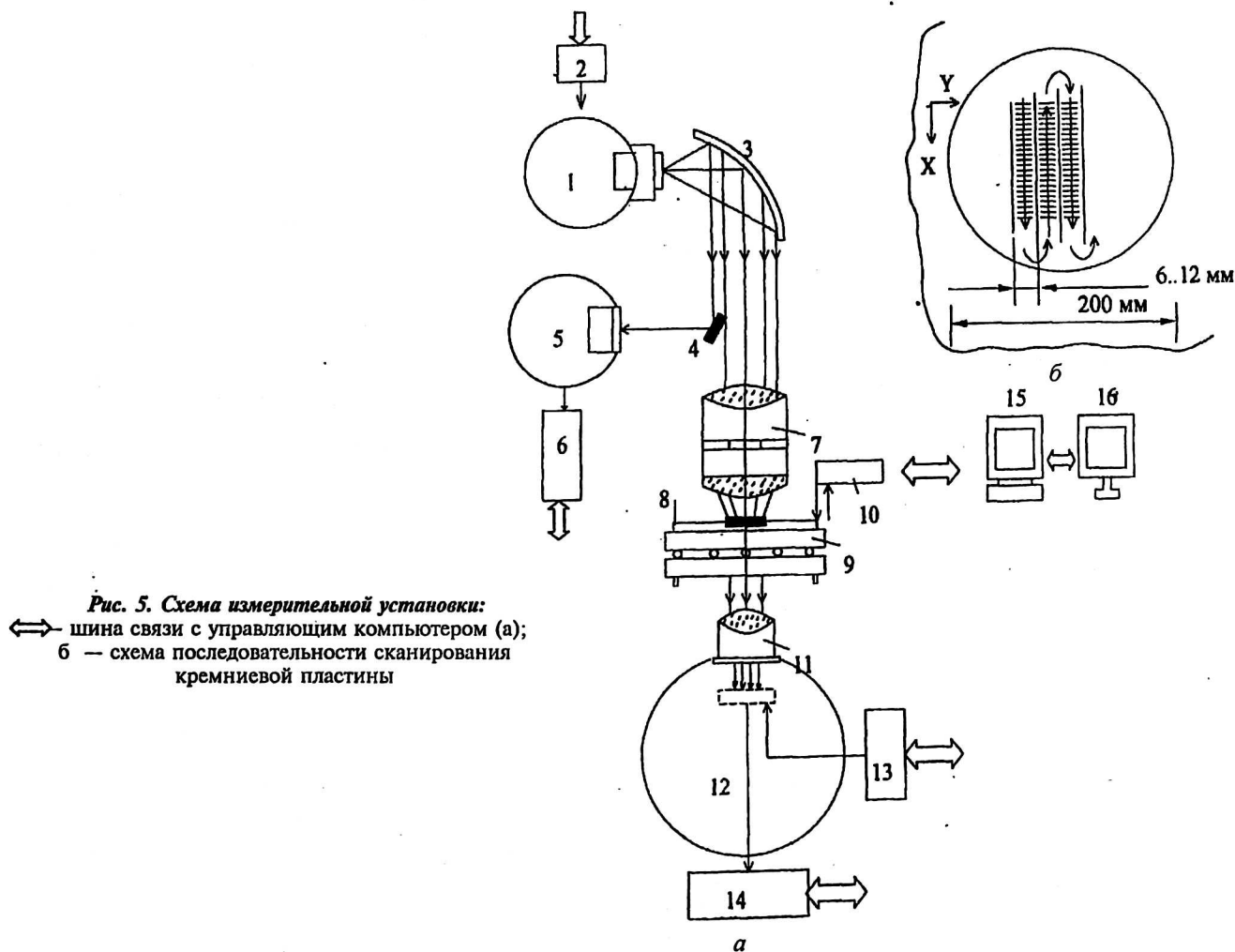


Рис. 5. Схема измерительной установки:
 ⇔ — шина связи с управляющим компьютером (а);
 б — схема последовательности сканирования кремниевой пластины

Таким образом, описанная выше структурная схема установки базируется на целом ряде обоснованных решений. В ней используются самые современные промышленно выпускаемые компоненты оптоэлектроники.

Выводы

1. При измерении пространственного распределения межзельного кислорода в кремниевых пластинах, применяемых в производстве микроэлектронных приборов (толщина 0,3—2 мм, D — до 200 мм), показана возможность использования оптического метода, обеспечивающего локальность измерений до 30 мкм при точности не хуже 10^{16} см⁻³. Особенности оптической схемы проектируемой установки являются:

малость углов расходимости пучков и апертур приемника ($\sim 3^\circ$), обусловленная высокой степенью локальности;

малая величина контрастов и абсолютных величин сигналов, подлежащих регистрации.

Эти факторы требуют особо тщательной оптимизации конструкции установки на этапе ее расчета и проектирования.

2. Сопоставлены две принципиально возможные схемы измерений;

a — схема с самосветящейся нагретой кремниевой пластиной;

b — схема с внешней подсветкой.

Сравнительный анализ предельно достижимых параметров показывает, что:

чувствительность метода с внешней подсветкой в 3—4 раза выше, чем в методе самосветящейся пластины;

абсолютная величина пороговых сигналов, достижимых в схеме (*a*), значительно меньше чем в схеме (*b*) и затрудняет регистрацию их даже почти идеальными близкими к VLIP приемниками излучения;

схема самосвечения требует более жесткой стабилизации температур фона и основных источников излучения;

более высокий контраст, будучи на первый взгляд достоинством схемы (*a*), в действительности является более существенным недостатком. Отсутствие однородного фонового "пьедестала" в этом варианте приводит к невозможности регистрации слабых сигналов многоэлементными ФП. Таким образом, выбрана единственно возможная схема (*b*).

3. Показано, что для согласования излучателя с многоэлементным ФП достаточно обеспечить

приблизительно трехкратное превышение фонового тока над средним уровнем темнового тока фоточувствительного элемента при том, что зарядовая емкость должна составлять не менее 1 пКл.

4. Оптимальным выбором приемника является фотодиодный ВЗН-приемник на КРТ, обеспечивающий режим, близкий к VLIP. Примером выбора являются гибридная ВЗН-линейка на основе КРТ-диодов фирмы SOFRADIR (Франция) типа TL056 со следующими параметрами: формат 480х6 элементов, емкость ячейки 1,2 пКл, динамический диапазон — 2500, рабочий ток $\approx 2 \cdot 10^{-8}$ А, средний уровень темнового тока $\approx 0,5 \cdot 10^{-8}$ А.

5. Оптимальным излучателем для данной системы является перестраиваемый лазер на основе (PnSt)Se благодаря следующим полезным качествам:

малые размеры области генерации излучения, позволяющие сформировать слаборасходящийся пучок излучения;

возможность реализации необходимого уровня мощности;

узкая спектральная ширина полосы излучения;

возможность электронного управления мощностью и длиной волны излучения в широких пределах.

Для формирования прямоугольной полосы требуемого размера на пластине, повышения до требуемого уровня освещенности на ФД-линейке и обеспечения однородности освещенности система подсветки пластины дополнена прямоугольным экраном и цилиндрической оптикой.

Литература

1. Bullis W. M. Oxygen Concentration Measurement// In: Semiconductors and Semimetals. Academic Press. 1994. V. 42: Oxygen in Silicon. P. 95—152.
2. Трищенко М. А., Винецкий Ю. П. Входные устройства приборов с зарядовой связью// Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 12. С. 2280—2309.
3. Винецкий Ю. П. Электронная инжекция слабых сигналов в гибридных ИК ПЗС: Дис. ... на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. — М.: НПО "Орион", 1989.
4. www.sofradir.com
5. Ohsawa A., Honda K., Ohkawa S., Ueda R. Determination of oxygen concentration profiles in silicon crystals observed by Scanning IR absorption using semiconductor laser// Appl. Phys. Letts. 1980. V. 3. № 2. P. 147—148.
6. Ohsawa A., Honda K., Shibatomi S., Ohkawa S. Microdefects distribution in Czochralski-grown silicon crystals// Ibid. 1981. V. 38. № 10. P. 787—788.
7. www.laser-components.com

Rational technical embodying an optical method of detail mapping the oxygen in silicon plates on the basis of modern reachings of optoelectronics

Yu. R. Vinetski, A. G. Titov, M. A. Trishenkov
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

On the basis of the analysis of a problem on a measurement of the spatial allocation of oxygen in silicon, the skeleton diagram of the installation is designed and justified. Search of the element basis has confirmed an opportunity of technical embodying.