

При таких температурах (850 °С) формируются слои, имеющие напряженные связи Si-O, оборванные связи Si не заполненные кислородом, уменьшенную силу связей Si-O, измененные углы связей Si-O по сравнению со слоями диэлектрика, получаемого путем термического окисления кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С и выше [3].

Данные исследования распределения КРП по площади пластины показали, что после проведения быстрой термической обработки как на пластинах, проходивших предварительную термообработку, так и без нее наблюдается равномерное распределение КРП по площади пластины (рис.). При этом имеет место значительное повышение КРП (поверхностного потенциала) на границе раздела кремний-диоксид кремния. Так, на пластинах КЭФ 4,5, не проходивших предварительной обработки после быстрой термообработки диоксида кремния, КРП повысилась с минус 1,211 до минус 0,215 В, а для пластин, прошедших обработку, она повысилась с минус 1,134 до минус 0,052 В. В случае пластин КДБ 12 эти величины составили с минус 0,725 до минус 0,210 В и с минус 0,359 до минус 0,284 В соответственно. Можно утверждать о значительном

улучшении свойств границы раздела кремний-диоксид кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры диоксида кремния по всей ее толщине.

#### Литература

1. Gorban, A.P. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method / A.P. Gorban, V.G. Litovchenko, P.Ch. Peikow // Phys. State Sol. (a). – 1972. – V. 10, № 1. – P. 289–292.
2. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Воробей Р.И., Жарин А.Л., Гусев О.К., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.
3. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // ФТП. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.

УДК 621.384.3

### МЕТОД СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Повышение эффективности обнаружения и распознавания различных удаленных объектов, включая малоконтрастные объекты и объекты с нулевой контрастностью, является основной задачей разработки и создания современных лазерно-локационных систем видения и автоматизированного «машинного» распознавания [1, 2]. Приоритетным направлением в этой задаче является создание трехмерных лазерных локаторов (3D-лидаров), обеспечивающих получение дальностных трехмерных изображений объектов [3, 4].

В таких системах дальностные трехмерные изображения объектов получают в виде матрицы (карты) расстояний до каждого из N элементов поверхности объекта. В качестве фотодетекторов в таких системах используются высокочувствительные многоэлементные фотодетекторы «мгновенного» действия с независимыми выходами всех фотодетекторов, обеспечивающие адекватное представление временной информации о моментах прихода отраженного сигнала на каждый из фотодетекторов путем времяпролетных «старт-стопных» измерений. Это позво-

ляет реализовать метод лазерной стереометрии, а именно, прямой метод измерения трехмерной формы объекта наблюдения в полярных координатах (угол-угол-дальность).

Основная сложность практической реализации данного подхода заключается в необходимости пропорционального увеличения числа времяизмерительных каналов с увеличением дискретной размерности матрицы  $N = N_x N_y$ . Так, например, даже при относительно небольшой размерности  $N = 64 \times 64$  элемента требуется 4096 времяпролетных измерительных каналов. Кроме того, также требуется N аналого-цифровых измерительных каналов для получения полутоновых изображений объекта или отдельная ПЗС-матрица с элементами обработки сигналов.

В 3D-лидарах зарубежного производства для этой цели используются специальные высокоинтегрированные 3D-камеры [3, 4].

Решение данной задачи с использованием гибридных технологий [5, 6] существенно ограничивает быстродействие и возможность получения трехмерных изображений без механического сканирования с высоким пространственным раз-

решением по кадру, т. е. с увеличением числа элементов  $N$ .

В предложенном методе стереометрической лазерной локации, основанный на применении стробируемых многоэлементных фотодетекторов с накоплением заряда, имеющих только один или более информационных выходов, таких как ПЗС, гибридные электронно-оптические преобразователи, представляющие собой ЭОП сопряженные с ПЗ-камерами. Базовая концепция метода была впервые предложена нами в работах [7, 8], дальнейшее развитие теории метода приведено в [9]. Метод позволяет одновременно получать как трехмерные, так полутонные изображения объектов с высоким быстродействием и разрешением на большом множестве точек поверхности  $N$  при использовании только одного времяизмерительного канала.

Длительность зондирующих лазерных импульсов должна удовлетворять условию

$$\tau_n \geq 2\xi_{e,max}(\vec{r}_1)/c, \quad (1)$$

где  $\xi_{e,max}(\vec{r}_1)$  – максимальное значение возвышения рельефа объекта;  $c$  – скорость света.

Координаты в плоскости изображения оптической системы лидара (ОС) введены таким образом, чтобы между координатами точек лоцируемой поверхности объекта и координатами ее парааксиального изображения существовала простая связь:

$$\vec{S} = \beta \vec{r}_1, \quad (2)$$

где  $\beta = d/R$  – коэффициент увеличения приемной ОС лидара;  $d$  – расстояние от линзы ОС до плоскости изображения, в которой установлен двумерный детектор изображений;  $R$  – расстояние от лидара до поверхности объекта; где  $\vec{S}$  – вектор координат в плоскости изображения лидара;  $\vec{r}_1$  – вектор координат в предметной плоскости.

Для описания пространственно-временной структуры отраженных световых полей введем функцию  $f(t) > 0$ , которая отлична от нуля на интервале времени равном длительности лазерного излучения  $\tau_n$  и имеет максимальное значение равное единице.

В рамках данной модели отраженный сигнал  $E_k(\vec{r}_1, t)$  можно представить совокупностью  $k$  парциальных пучков (субпучков), отраженных от  $k$  точек поверхности в радиальном направлении. Под парциальным пучком понимаем лазерное излучение, попадающее на один элемент (пиксель) двумерного матричного фотодетектора ОС. Временное распределение запаздывание времени прихода  $\tau_k(\vec{S}, t)$  каждого из субпучков относительно момента излучения лазерного импульса  $t_0$  однозначно связано с распределением возвышений рельефа  $\xi_b(\vec{r}_1)$  поверхности объекта. При этом пространственно – временная структура отраженного светового поля определяется уравнением:

$$I(\vec{S}, t) = \sum_k f^2(t - \tau_k) |E_k(\vec{S})|^2, \quad (3)$$

где  $\tau_k = 2R_{\xi_{\text{ск}}}/c$  – время прихода лазерного импульса, отраженного от возвышения поверхности в  $k$ -той точке, находящейся расстоянии  $R_{\xi_{\text{ск}}}$  от лидара.

В соответствии с алгоритмом метода регистрируется два двумерных распределения интенсивности  $N$  парциальных пучков  $B_1(\vec{S})$ ,  $B_2(\vec{S})$  отраженного светового поля. Причем распределение  $B_1(\vec{S})$  должно обязательно включать передний или задний фронт отраженного поля. В частности, для участка реализации  $E(\vec{S}, t)$ , содержащего передний фронт поля, распределение  $B_1(\vec{S})$  получаем путем двумерного накопления поля  $E(\vec{S}, t)$  в пространственно – временном стробе длительностью:

$$\tau_{c,1} = t_2 - t_1, \quad (4)$$

где  $t_1$  – момент начала прихода отраженного светового поля;  $2\xi_{e,max}(\vec{r}_1)/c \leq t_2 \leq \tau_n$ .

В соответствии с (3) и (4)  $B_1(\vec{S})$  определяется уравнением

$$B_1(\vec{S}) = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \times \\ \times \int_{t_1}^{t_2} f^2(t - \tau_k) dt = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) \times \\ \times |E_k(\vec{S})|^2 (t_2 - \tau_k), \quad (5)$$

Второе распределение  $B_2(\vec{S})$  получаем путем двумерного накопления полной реализации поля  $E(\vec{S}, t)$  по всей длительности его реализации  $T$ :

$$B_2(\vec{S}) = K_{\text{отр}}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \times \\ \times \int_{t_1}^{t_1+T} f^2(t - \tau_k) dt = \\ = K_{\text{отр}}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \tau_n. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что двумерное распределение  $B_2(\vec{S})$  представляет собой полутонное изображение лоцируемого объекта с селекцией фона обратного рассеяния.

Из отношения (5) и (6) получаем двумерное распределение временных сдвигов  $N$  парциальных пучков отраженного излучения в следующем виде:

$$\tau(\vec{S}) = t_2 - \tau_n B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S}). \quad (7)$$

Отсюда, получаем распределение искомого возвышений лоцируемого объекта (рельеф) на множестве  $N$  точек его поверхности:

$$\xi_b(\vec{r}_1) = c/2(t_2 - \tau_n B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S})), \quad (8)$$

а также расстояний  $R_{\xi}(\vec{r}_1)$  до каждой из точек возвышений в виде:

$$R_{\xi}(\vec{r}_1) = R_0 + \xi_b(\vec{r}_1), \quad (9)$$

где  $R_0 = R_{\xi,max}$  – базовое расстояние, определяемое путем измерения длительности временного

интервала  $t_1 - t_0$ , как расстояние до точки поверхности с максимальным возвышением.

Предложенный метод стереометрической лазерной локации позволяет одновременно определять как полутоновые изображения лоцируемых объектов с селекцией фона обратного рассеяния, так и их трехмерные характеристики  $\xi_k(\vec{r}_1)$  и расстояния  $R_\xi(\vec{r}_1)$  на большом множестве  $N$  точек поверхности объекта, которое может составлять десятки и сотни тысяч в зависимости от размерности используемых фотодетекторов с накоплением заряда. Разрешающая способность метода  $\Delta\xi_B(\vec{r}_1)$  не хуже 0,8-1,5 см.

### Литература

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 478 с.
2. Балоев В.Н., Мишанин С.С., Овсянников В.А., Якубсон С.Е., Яцык В.С. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения // Оптический журнал, 2012. – Т 9. – № 3. – С. 22–32.
3. Chua S.Y., Wang X., Guo N., Tan C.S., Chai T.Y., Seet G.L. Improving three-dimensional (3D) range gated reconstruction through time-of-

flight (TOF) imaging analysis // J.Eur. Opt. Soc.-Rapid. 2016. 11(16015). P.16015-1 – 16015-6.

4. Itzler M. 3-D LIDAR Imaging Cameras with Single-Photon Sensitivity based on Geiger-mode APDS. // ILMF 2015 – Denver. 2015. P. 1–42.

5. Ярошенко И.Ф., Ильин С.А., Капитанов Г.А. Трехмерное приемное устройство лазерного излучения // Оптический журнал, 2005. – Т. 72. – № 10. – С. 35–39.

6. Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н. Лазерная информационная система сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал, 2015. – Т. 82. – № 2. – С. 27–33.

7. Пат. SU №1593429 А1, G01S17/00. «Способ стереометрической оптической локации» / Иванов В.И. 1988.

8. Пат. SU №1591621 А1, G01C3/08. «Способ определения рельефа лоцируемого объекта при импульсной локации» / Иванов В.И. 1988.

9. Иванов В.И., Иванов Н.И. Получение дальностных 3D изображений высокодинамичных объектов по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения // Квантовая электроника, 2018. – Т. 48. – № 7. – С. 679–682.

УДК 621.3.083.92

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>,  
Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Колтунович Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Одной из типичных задач электрических измерений является задача определения фазового сдвига двух гармонических сигналов. В частности, определение фазового сдвига сигналов отклика электрометрического зонда в двух пространственно разнесенных точках поверхности полупроводниковой пластины является одной из составляющих разрабатываемого метода характеристики приповерхностных слоев полупроводника.

Обработка сигналов производится методом DSP (Digital Signal Processing, цифровая обработка сигналов) с использованием математических библиотек CMSIS DSP Software Library [1] для процессора ARM Cortex M7. При регистрации двух гармонических сигналов, сдвиг фаз между которыми требуется определить, производится их аналого-цифровое преобразование, в результате которого в памяти процессора формируются два массива данных  $U1$  и  $U2$  по 512 элементов в каждом. Длина каждого из массивов соответствует 4 целым периодам  $T$  колебаний сигнала. Шаг квантования, таким образом, составляет  $\Delta t = 4T/512 = T/128$ . Отсчеты сигнала в

массивах представлены в 32-битном знаковом формате с плавающей запятой (**float32**). Первичная обработка сигналов включает в себя центрирование массивов, т.е. вычисление и вычитание из массива среднего арифметического значения, вследствие чего в массивах содержится информация только о переменной составляющей измерительных сигналов.

Для упрощения дальнейших вычислений оба массива нормируются на 1 путем нахождения максимального элемента в каждом из массивов и деления на него всех элементов соответствующего массива:

$$\begin{aligned} U1[i] &= U1[i]/\max(U1), \\ U2[i] &= U2[i]/\max(U2). \end{aligned} \quad (1)$$

После выполнения этой операции оба массива будут содержать элементы с диапазоном значений  $u_1[i] \in [-1; 1]$  и  $u_2[i] \in [-1; 1]$ .

Пусть в первом массиве содержатся отсчеты гармонического сигнала с единичной амплитудой и начальной фазой  $\varphi_0$ :