

Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.229.3

УДК 681.7.055.4

Е.А. Никулина

РАСЧЕТ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ С УЧЕТОМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ И ЧАСТИЧНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

Е.А. Nikulina

POINT-SPREAD FUNCTION COMPUTATION UNDER THE CONDITIONS OF BIREFRINGENCE AND PARTIAL COHERENCE OF LIGHTING USING GPUS

Рассмотрено применение метода представления комплексной амплитуды через суперпозицию плоских волн для учета влияния двулучепреломления в фотолитографических системах. Изображение в проходящем свете при частично когерентном освещении проводится по методу интегрирования по источнику. Показана вычислительная сложность предложенной методики, а также отмечены преимущества использования графических процессоров для решения такого рода задач. Описаны особенности использования графических процессоров для решения неграфических задач. Приведены оценки временных затрат при расчете по описанной методике с применением как графических, так и традиционных процессоров. Показаны результаты моделирования функции рассеяния точки в различных условиях.

ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ; ПОЛЯРИЗАЦИЯ; ФУНКЦИЯ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ; ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ; CUDA.

This paper considers an application of the method of representing a complex amplitude as a superposition of plane waves to take birefringence in photolithographic systems into account. The image in transmitted light under partially coherent lighting is conducted according to the source integral method. This paper shows the computational costs of the proposed method, also mentioning the benefits of GPU computation for problem-solving of this type. Special aspects of GPU computation for non-graphical problem-solving are described. This paper introduces estimates of span time in case of computation by means of the mentioned method with GPU as well as CPU. This paper shows the results of simulating the point-spread function under different conditions.

BIREFRINGENCE; POLARIZATION; POINT SPREAD FUNCTION; PARALLEL COMPUTING; CUDA.

Несмотря на широкое распространение и использование во многих сферах научной и повседневной жизни полупроводниковых микросхем, их производство остается одним из сложнейших технологических процессов за всю историю человечества.

Как известно, основным способом производства полупроводниковых микросхем является фотолитография, включающая в себя сложные технологические операции, в том числе отжиг стеклянной заготовки, который сокращает остаточные неравномер-

ности материала. Однако даже при весьма длительном отжиге стекла в нем наблюдаются остаточные напряжения, в результате чего в оптически изотропном от природы стекле возникает оптическая анизотропия, которая проявляется в двойном лучепреломлении. При падении световой волны на анизотропную среду в ней возникают две волны с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации, скорость распространения одной волны не зависит от направления распространения (обыкновенный луч), а скорость распространения другой волны зависит от направления распространения (необыкновенный луч). Кроме того, к остаточным напряжениям, определяющим появление двойного лучепреломления, приводят структурные изменения при механической обработке стекла и кристаллических материалов. В оптических системах для микролитографии наличие остаточного двулучепреломления в материалах линз может стать причиной заметного ухудшения качества изображения [1].

Ухудшение качества изображения обусловлено влиянием на разрешающую способность изображения деформации волнового фронта, выраженным в длинах волн применяемого излучения. Таким образом, влияние деформации волнового фронта, вызванного двулучепреломлением, может стать очень серьезным, если используется излучение с длиной волны, равной 193 нм, или с длиной волны, равной 157 нм [2, 3].

Для определения предельного разрешения изображения необходимо учитывать недостаток скалярных представлений при вычислении распределения освещенности в дифракционном изображении точки, а также частичную когерентность источников излучения [4]. Все это требует разработки новых алгоритмов расчета формирования изображения, основанных на более точном применении дифракционной теории в случае присутствия двулучепреломления. Также, в связи с невозможностью отбраковывания по величине двулучепреломления заготовок, возникает необходимость учета и компенсации двулучепреломления в оптических высокоапертурных фотолитографических системах.

В связи с многократным расчетом передаточной функции применение обычных скалярных методов расчета функции рассеяния точки в случае частично когерентного освещения приводит к значительному увеличению вычислительных нагрузок по сравнению со случаем полностью когерентного освещения.

Более строгое применение дифракционной теории, с учетом остаточного двулучепреломления в материалах линз, также приводит к дополнительному приросту вычислений. Кроме того, высочайшие требования к качеству изображения фотолитографических систем приводят к увеличению дискретизации, а следовательно, и к увеличению объемов обрабатываемых данных. Таким образом, кроме оптимизации самих методик расчета также необходимо обратить пристальное внимание на программную реализацию расчетных алгоритмов.

Для применения строгой теории дифракции в случае высокоапертурных систем используют представление комплексной амплитуды монохроматического поля через суперпозицию базисных плоских волн.

Базисная плоская волна [5] имеет единичную амплитуду с линейной поляризацией, направление ее распространения в пространстве определяется направляющими косинусами c_x , c_y и c_z . Состояние поляризации базисной плоской волны может изменяться при взаимодействии с поляризующими средами.

Плоские волны, которые удовлетворяют перечисленным условиям, будем считать элементами базиса аппроксимации комплексной амплитуды монохроматического поля произвольного вида, причем комплексные коэффициенты аппроксимации будут представлять собой спектр векторных плоских волн.

Комплексную амплитуду монохроматического поля можно представить в виде суперпозиции базисных векторных плоских волн единичной амплитуды:

$$\mathbf{E} = \sum_i \sum_j \begin{pmatrix} \bar{f}_{ij}^x & 0 & 0 \\ 0 & \bar{f}_{ij}^y & 0 \\ 0 & 0 & \bar{f}_{ij}^z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{E}_{ij}, \quad (1)$$

где \bar{f}_{ij}^x , \bar{f}_{ij}^y и \bar{f}_{ij}^z – коэффициенты разложения поля в спектр плоских волн;

$\mathbf{E}_{ij} = \frac{\mathbf{k}_{ij} \times \mathbf{p}_{ij}}{|\mathbf{k}_{ij} \times \mathbf{p}_{ij}|}$ – базисная векторная плоская волна единичной амплитуды; \mathbf{p}_{ij} – вектор поляризации, определяющий состояние поляризации, перпендикулярный векторной плоской волне \mathbf{E}_{ij} ;

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} A'_0 \rho_x \\ A'_0 \rho_y \\ \sqrt{1 - (A'_0)^2 (\rho_x^2 + \rho_y^2)} \end{pmatrix} \text{ – вол-}$$

новой вектор, записанный в канонических координатах, направление плоской волны

$$\mathbf{R}_z = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta e^{-i\delta} & \cos \theta \cdot \sin \theta (1 - e^{-i\delta}) & 0 \\ \cos \theta \cdot \sin \theta (1 - e^{-i\delta}) & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta e^{-i\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ –}$$

матрица направления поляризации; θ , δ –

угол и величина поляризации; $\mathbf{V}_m = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ –

вектор Максвелла–Джонса в данном случае описывает линейную поляризацию.

Перемножив векторы, в соответствии с формулой 2 нетрудно найти коэффициенты разложения комплексной амплитуды поля по спектру плоских волн. Далее распространение поля через оптическую систему необходимо рассматривать отдельно для трех компонент комплексной амплитуды. Если не учитывать дифракционное рассеяние на элементах фазосдвигающего шаблона, то компоненты комплексной амплитуды поля можно считать равными комплексной амплитуде поля на входном зрачке, вычисленной так же, как и при использовании скалярной модели.

Моделирование формирования изображения при частично-когерентном освещении производится с использованием метода интегрирования по источнику [7, 8].

Источник представляется как совокупность точек, каждая из которых создает полностью когерентное освещение предмета, а оптическая система – соответствующее ему изображение. Описание распространения электромагнитного поля от предмета к изо-

задано при помощи направляющих косинусов c_x , c_y и c_z , A'_0 – задняя апертура проекционного объектива, ρ_x и ρ_y – канонические координаты на зрачке.

После прохождения двулучепреломляющего материала обыкновенные и необыкновенные лучи, распространяющиеся в одном направлении, складываются таким образом, что результирующий луч становится эллиптически поляризованным [6]. Следовательно, вектор поляризации можно вычислить по формуле:

$$\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{k}_{ij} \times (\mathbf{R}_z \cdot \mathbf{V}_m), \quad (2)$$

где

бражению осуществляется с использованием дифракционной теории:

$$\mathbf{U}_4 = \begin{pmatrix} u_4^x \\ u_4^y \\ u_4^z \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} F^{-1}\{F\{U_0(\eta_x, \eta_y) \cdot T(\eta_x, \eta_y)\} \cdot f \cdot \bar{f}^x\} \\ F^{-1}\{F\{U_0(\eta_x, \eta_y) \cdot T(\eta_x, \eta_y)\} \cdot f \cdot \bar{f}^y\} \\ F^{-1}\{F\{U_0(\eta_x, \eta_y) \cdot T(\eta_x, \eta_y)\} \cdot f \cdot \bar{f}^z\} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где \mathbf{U}_4 – распределение комплексной амплитуды поля на изображении; \bar{f}^x , \bar{f}^y и \bar{f}^z – коэффициенты разложения комплексной амплитуды поля по спектру плоских волн; f – зрачковая функция; $U_0(\eta_x, \eta_y) = \exp[2\pi i(\eta_x \xi_x^S + \eta_y \xi_y^S)]$ – комплексная амплитуда поля на предмете от отдельной точки источника; $T(\eta_x, \eta_y)$ – функция, описывающая форму, размеры и комплексное пропускание предмета.

Распределение интенсивности изображения, формируемого отдельной точкой источника, определяется следующим выражением:

$$I'(\eta'_x, \eta'_y) = |u_4^x|^2 + |u_4^y|^2 + |u_4^z|^2. \quad (4)$$

Таким образом, для определения распределения интенсивности используются все три декартовых составляющих вектора

поля. Итоговое распределение интенсивности изображения, полученного от источника произвольной формы, вычисляется интегрированием изображений, полученных от каждой точки источника, по интенсивности.

Предварительные результаты исследования влияния двулучепреломления по описанной методике в реальных образцах флюорита рассмотрены в статье [9].

Применение плоских волн для математического моделирования полей удобно тем, что можно так же, как и в модели на основе скалярной теории, использовать аппарат преобразования Фурье. Несмотря на относительно небольшое усложнение расчетов по сравнению со скалярной моделью, расчет по данной методике займет приблизительно в три раза больше времени. Для оценки объема требуемых вычислений заметим, что размер выборки обычно составляет 1024×1024 точки, степень когерентности источника достигает 0,5, и для каждой его точки требуется выполнить шесть преобразований Фурье по всему полю.

Проблема объемных потоковых вычислений постоянно возникает во многих современных областях науки. Для увеличения скорости потоковых вычислений и обработки большого объема данных в последнее время получило активное развитие новое направление – использование графических процессоров для решения неграфических задач.

Одним из флагманов этого движения является технология CUDA – программно-аппаратная вычислительная архитектура NVIDIA, основанная на расширении языка C, которая дает возможность организации доступа к набору инструкций графического ускорителя (GPU) и управления его памятью при организации параллельных вычислений.

Основными преимуществами технологии CUDA являются ее простота – все программы пишутся на «расширенном» языке C, наличие хорошей документации, набор готовых инструментов, набор готовых библиотек (например, библиотека, позволяющая выполнять быстрое преобразование Фурье для больших массивов), кроссплатформенность [10].

Для решения задач CUDA использует очень большое количество параллельно выполняемых нитей (потоков), при этом

обычно каждой нити соответствует один элемент вычисляемых данных. За счет подобного распараллеливания и появляется многократный прирост производительности относительно обычных вычислений при помощи центрального процессора (CPU) компьютера, выполняющего расчет всех нитей последовательно.

Идеология использования CUDA строится на концепции о том, что GPU выступает в роли массивно-параллельного сопроцессора к CPU. Программа на CUDA задействует как CPU, так и GPU. При этом обычный (последовательный, т. е. непараллельный) код выполняется на CPU, а для массивно-параллельных вычислений соответствующий код выполняется на GPU как набор одновременно выполняющихся нитей [11].

Использование технологии CUDA позволило увеличить производительность вычислений в десятки раз. Для расчета выборки размером 256×256 по разработанному методу базисных плоских волн с фактором когерентности 0,5 при помощи обычного процессора потребовалось 11 мин 12,4 с, а с использованием технологии CUDA – 0,1 с. Полученная в этом случае функция рассеяния точки приведена на рис. 1. Расчет выборки 1024×1024 при тех же параметрах при помощи технологии CUDA занял всего 10,9 с.

Для оценки влияния двулучепреломления на качество изображения проекционных

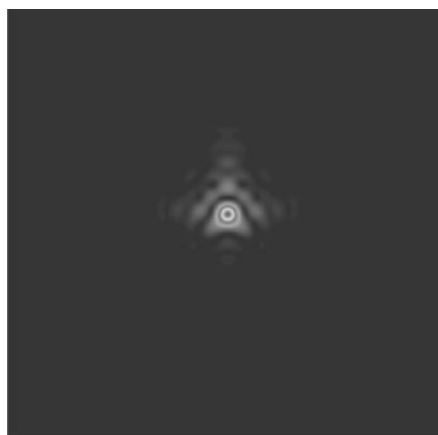


Рис. 1. ФРТ (центральный максимум 0,6) при частично когерентном освещении (степень когерентности 0,5) в присутствии двулучепреломления (0–8 нм/см) с учетом среднеквадратического отклонения волнового фронта 0,098 длины волны

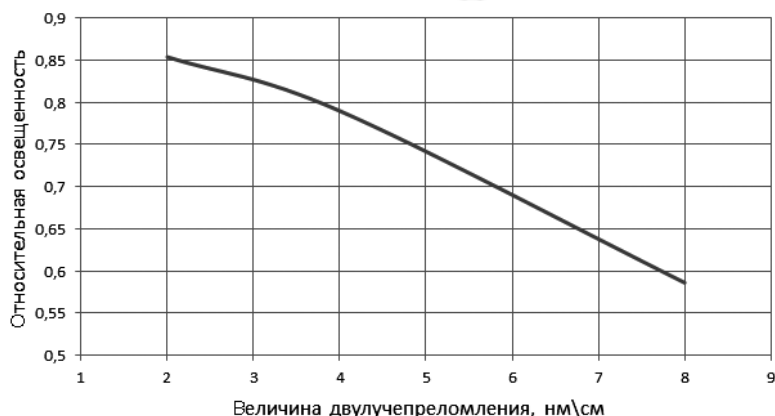


Рис. 2. График зависимости величины относительной освещенности в центре кружка Эри от средней величины двулучепреломления
Дополнительное среднеквадратическое отклонение волнового фронта 0,098 длины волны

фотолитографических систем проведено моделирование подобных систем при разных величинах двулучепреломления, с учетом волновых aberrаций этих систем и частичной когерентности источника. Коэффициент когерентности принимался равным 0,3.

На рис. 2 показан график зависимости величины относительной освещенности в центре кружка Эри от средней величины двулучепреломления. Величина освещенности оценивается относительно освещенности в центре дифракционного изображения точки оптической системой с такими же физическими характеристиками, но при отсутствии aberrаций и любых других искажающих факторов. Таким образом, относительная освещенность, равная единице, соответствует идеальной системе.

Приведенные исследования показали, что при разработке фотолитографических систем крайне важно учитывать не только волновые aberrации, но и остаточное двулучепреломление оптических элементов. Величина перераспределения энергии определяет относительную потерю освещенности в центре дифракционного пятна, а ее расчет можно произвести по описанной методике.

Использование технологии параллельных вычислений на графическом процессоре позволяет в этом случае значительно уменьшить время расчета. Главная особенность использования графических процессоров для решения вычислительных задач — необходимость постановки одинакового условия (например, математической формулы) для объемного массива данных, что позволяет эффективно обрабатывать параллельные потоки вычислений. Такой подход требуется для решения многих оптических задач, при которых очень часто возникает необходимость обработки множества лучей по одинаковым законам, но с разными входными данными.

Благодаря встроенной реализации алгоритмов быстрого преобразования Фурье предложенная методика расчета функции рассеяния точки легко поддавалась оптимизации по концепции параллельных вычислений. Однако графические процессоры могут использоваться и для решения многих других физических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hlubina P., Ciprian D. Absolute phase birefringence dispersion in polarization-maintaining fiber or birefringent crystal retrieved from a channeled spectrum // Optics Letters. 2010. Vol. 35. No. 10. Pp. 1566–1568.
2. Sarani A., Abdulhalim I. Spectropolarimetric method for optical axis, retardation, and birefringence dispersion measurement // Opt. Eng. 2009. Vol. 48.

- No. 5. P. 053601.
3. Sang-Kon Kim Polarized Effects in Optical Lithography with High NA Technology // Journal of the Korean Physical Society. 2007. Vol. 50. No. 6. Pp. 1952–1958.
4. Yanqiu Li, Xuejia Guo, Xiaolin Liu, Lihui Liu A technique for extracting and analyzing the polarization aberration of hyper-numerical aperture

image optics // Proc. SPIE 9042, Internat. Conf. on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. 2013.

5. **Домненко В.М., Бурсов М.В., Иванова Т.В.** Моделирование формирования оптического изображения: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 141 с.

6. **Ландсберг Г.С.** Оптика: Учеб. пособие для вузов. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003. 848 с.

7. **Иванова Т.В., Зуева Л.В.** Исследование способов дискретизации источника при моделировании фотолитографического изображения // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 5. С. 48–52.

8. **Можаров Г.А.** Теория аберраций оптических систем. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 288 с.

9. **Никулина Е.А., Зверев В.А.** Исследование влияния двулучепреломления на качество изображения фотолитографических систем при частично когерентном освещении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 196–201.

10. Введение в технологию CUDA – Компьютерная графика и мультимедиа [электронный ресурс]// URL: <http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue16/cuda> (дата обращения: 28.05.2015).

11. **Боресков А.В., Харламов А.А.** Основы работы с технологией CUDA. 2010. С. 20–33.

REFERENCES

1. **Hlubina P., Ciprian D.** Absolute phase birefringence dispersion in polarization-maintaining fiber or birefringent crystal retrieved from a channeled spectrum. *Optics Letters*, 2010, Vol. 35, No. 10, Pp. 1566–1568.

2. **Sarani A., Abdulhalim I.** Spectropolarimetric method for optical axis, retardation, and birefringence dispersion measurement. *Opt. Eng.*, 2009, Vol. 48, No. 5, P. 053601.

3. **Sang-Kon Kim.** Polarized Effects in Optical Lithography with High NA Technology. *Journal of the Korean Physical Society*, 2007, Vol. 50, No. 6, Pp. 1952–1958.

4. **Yanqiu Li, Xuejia Guo, Xiaolin Liu, Lihui Liu.** A technique for extracting and analyzing the polarization aberration of hyper-numerical aperture image optics. *Proc. SPIE 9042, International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments*, 2013.

5. **Domnenko V.M., Bursov M.V., Ivanova T.V.** Modelirovaniye formirovaniya opticheskogo izobrazheniya [Simulation of optical imaging]. St. Petersburg: NIU ITMO Publ., 2011, 141 p. (rus)

6. **Landsberg G.S.** *Optika [Optics]*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2003, 848 p. (rus)

7. **Ivanova T.V., Zuyeva L.V.** Issledovaniye

sposobov diskretizatsii istochnika pri modelirovaniyefotolitograficheskogo izobrazheniya [Investigation of the sample source in the simulation of the photolithographic image]. *Opticheskiy zhurnal [Journal of Optical Technology]*, 2012, Vol. 79, No. 5, Pp. 48–52. (rus)

8. **Mozharov G.A.** *Teoriya aberratsiy opticheskikh sistem [The theory of the aberrations of optical systems]*. St. Petersburg: Lan Publ., 2013, 288 p. (rus)

9. **Nikulina Ye.A., Zverev V.A.** Issledovaniye vliyaniya dvulucheprelomleniya na kachestvo izobrazheniya fotolitograficheskikh sistem pri chastichno kogerentnom osveshchenii [Study of birefringence influence on image quality of photolithography systems in view of partially-coherent light source]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]*, 2015, Vol. 15, No. 2, Pp. 196–201. (rus)

10. *Vvedeniye v tekhnologiyu CUDA – Kompyuternaya grafika i multimedia [Introduction to CUDA – Computer graphics and multimedia]*. Available: <http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue16/cuda> (Accessed: 28.05.2015).

11. **Boreskov A.V., Kharlamov A.A.** *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA [Basics CUDA technology]*, 2010, Pp. 20–33. (rus)

НИКУЛИНА Екатерина Алексеевна – аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

E-mail: katerina.nikulina@gmail.com

NIKULINA Ekaterina A. *St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

197101, Kronverkskiy Ave. 49, St. Petersburg, Russia.

E-mail: katerina.nikulina@gmail.com