

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Иванов Владимир Игоревич**

аспирант

**Кондратенко Владимир Степанович**

д-р техн. наук, профессор, директор

**Борисовский Владимир Евгеньевич**

д-р техн. наук, профессор, заместитель директора

Институт высоких технологий

ФГБОУ «Московский государственный

университет приборостроения и информатики»

г. Москва

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ С ОРГАНИЧЕСКИМИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИМИ СТРУКТУРАМИ

***Аннотация:** в работе теоретически и экспериментально исследованы зависимости и влияния скорости и плотности мощности лазерного излучения с эллиптическим сечением пучка на глубину трещины, образующейся в процессе ЛУТ на установке РТ-350. Основное внимание уделяется кремниевым пластинам толщиной 725 мкм, т.к. именно их лазерная обработка представляется наиболее перспективной в производстве микродисплеев на основе органических светоизлучающих структур (ОСИД или OLED).*

***Ключевые слова:** лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ), резка кремниевых подложек на кристаллы, ОСИД микродисплеи.*

#### Введение

После открытия электролюминесценции в органических материалах в начале 1950-х гг. и развития разработок проводящих органических полимеров с 2000 г. началось создание органических светоизлучающих диодов (ОСИД). Для

их создания используются тонкопленочные многослойные структуры, состоящие из слоев нескольких органических полимеров, имеющих разные назначения, такие как – эмиссия, инжекция и транспортировка дырок и электронов, изоляция, разделение [1].

Метод ЛУТ [2] в современной индустрии наиболее эффективен и востребован при прецизионной резке широкого класса хрупких неметаллических материалов. Метод ЛУТ применяется для резки сапфировых пластин и плоских дисплейных панелей с использованием СО<sub>2</sub>-лазера мощностью до 100 Вт и длиной волны излучения 10,6 мкм [3; 4], в связи с тем, что стекло и сапфир непрозрачны для этой длины волны. Но при резке подложек из кремния применять излучение СО<sub>2</sub>-лазера нецелесообразно из-за частичной прозрачности кремния для данной длины волны излучения (~25%, см. рис. 1).

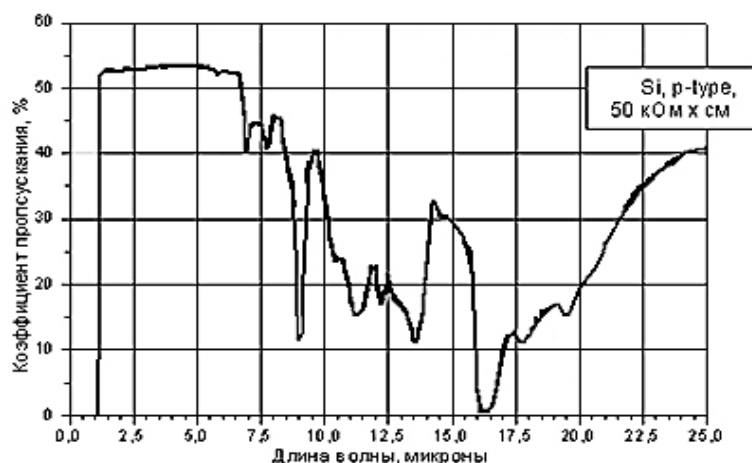


Рис. 1. Коэффициент пропускания кристаллического кремния р-типа в диапазоне длин волн 0–25 мкм

В данной работе результаты ЛУТ кремниевых пластин с напыленными структурами ОСИД получены на установке РТ-350, производства ОАО Московский завод «Сапфир» (Россия), с полупроводниковым лазером – «LIMO-Lissotschenko Microoptik GmbH» (Германия) с длиной волны излучения 0,808 мкм и мощностью до 450 Вт [5]. Для повышения эффективности ЛУТ кремниевых пластин на кристаллы, в установке [5] используется лазерный пучок эллип-

тической формы  $2a \times 2b$  с меньшими размерами поперечной, малой оси, и с оптимальными размерами большой, продольной оси, по уровню интенсивности  $1/e^2$  от максимального значения и возможностью фокусировки пучка для подбора оптимальных размеров.

### *Исследование процесса ЛУТ кремниевых пластин*

Оптимизировать параметры лазерного пучка для сквозного ЛУТ можно экспериментально, определив соотношение между скоростью резки кремния, плотностью мощности и эллиптичностью пучка излучения лазерной системы установки РТ-350. Для эксперимента, были использованы односторонне полированные монокристаллические кремниевые пластины 8» диаметра, толщиной  $\sim 725$  мкм с напыленными пленками Al, имитирующими рабочую область микродисплеев (рис. 2).



Рис. 2. Схематическое изображение кристаллов с размерами, имеющими значение при ЛУТ

Цель испытаний заключалась в оптимизации режимов ЛУТ, а именно: скорости ЛУТ, плотности мощности излучения и размеров эллиптического пучка для получения наиболее качественного сквозного раскола кремния. Были получены трещины при различных скоростях и количествах проходов. Обнаружено, что один проход лучом на определенной скорости достигает того же или даже лучшего качества и эффективной скорости ЛУТ, как многократное прохождение с более высокой скоростью.

Данные в таблице 1, показывают, что при остро сфокусированном пучке с эллиптичностью  $2a \times 2b = 45:1$  на различных скоростях ЛУТ не получен сквозной раскол пластины, и трещина забита осколками, только при высокой мощности, когда ее плотность достигает  $975 \text{ Вт/мм}^2$  удалось получить сквозной раскол, но его края плохого качества из-за обкалывания. Это вызвано чрезмерным нагревом материала за счет аккумуляции тепла при острой фокусировке, что приводит к плавлению и засорению трещины. С уменьшением эллиптичности до  $16:1$ , есть минимальная абляция, и достигается чистый полный раскол насквозь в 2–3 прохода со скоростью  $40\text{--}70 \text{ мм/с}$  при плотности мощности  $587\text{--}680 \text{ Вт/мм}^2$ .

Таблица 1

Параметры ЛУТ 725 мкм кремниевых пластин

Эллиптичность	Плотность мощности, Вт/мм <sup>2</sup>	Кол-во проходов	Скорость резки, мм/с	Насквозь или нет	Замечания
45:1	626	1	10, 20	нет	Перегрев
45:1	654	1	50, 60, 100	нет	Перегрев
45:1	685	1-2	60, 80, 100, 120	нет	Перегрев
45:1	779	1-3	80, 100, 110, 120	нет	Перегрев
45:1	841	1-3	100, 110, 140, 160	нет	Перегрев
45:1	975	1-3	50	да	Перегрев
16:1	436	1	20	нет	Абляция, без реза
16:1	456	1	50	нет	Абляция, без реза
16:1	478	1	20, 30, 40, 60, 80, 100	нет	Незаметный рез
16:1	543	1	20, 30, 40, 50, 60, 70	нет	Незаметный рез
16:1	587	2	60, 70	да	Чистый рез
16:1	680	3	10, 20, 30, 40	да	Чистый рез
7:1	957	1	30, 40, 50, 60, 100	да	Частичная абляция, перегрев
7:1	1000	1	30, 40, 50, 60, 70	да	Частичная абляция, перегрев
7:1	1047	1	30, 40, 50, 100	да	Перегрев
7:1	1190	1	30, 40, 50, 60	да	Чистый рез
7:1	1285	1	30, 40, 50, 100	да	Перегрев
7:1	1490	1	30, 40, 50, 100	да	Перегрев

### Результаты ЛУТ кремниевых пластин толщиной 725 мкм

Полученные результаты состоят из массива измерений глубины трещины для 9 скоростей резки и 9 коэффициентов эллиптичности (81 точка данных в общей сложности). Эти данные изображены на рис. 3, они были упорядочены для того, чтобы показать, как глубина трещины зависит от коэффициента эллиптичности пучка в диапазоне от 5 до 45 для скоростей резки от 20 мм/с до 120 мм/с.

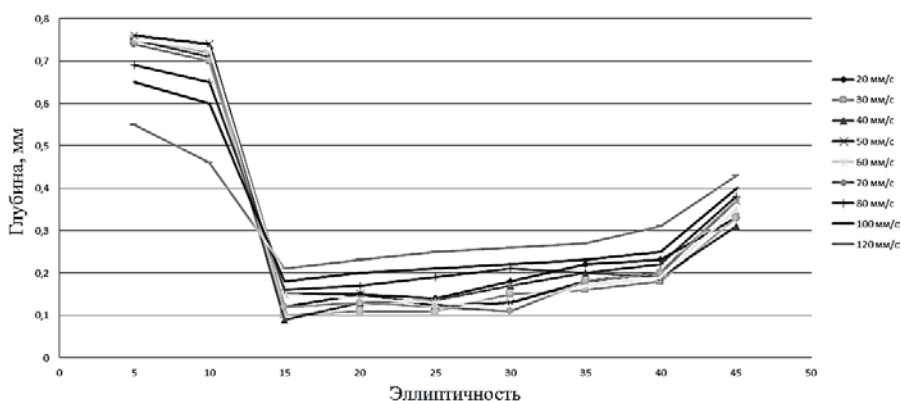


Рис. 3. Графики зависимостей глубины трещины от эллиптичности лазерного пучка, показывающие, что существует оптимальная скорость ЛУТ для достижения определенной глубины трещины

Для средней скорости прохода 50–60 мм/сек, значения эллиптичности между 7:1 и 10:1 приводят к раскалыванию 725 мкм пластины насквозь и с увеличением относительного удлинения пучка, резко снижается глубина трещинообразования, а затем с плавным сглаживанием крутизны снова растет. В качестве иллюстрации этого явления представлен ряд изображений на рис. 4, полученных при увеличении  $20\times$  с помощью оптического микроскопа PSM – 1000 фирмы Motic (Китай).

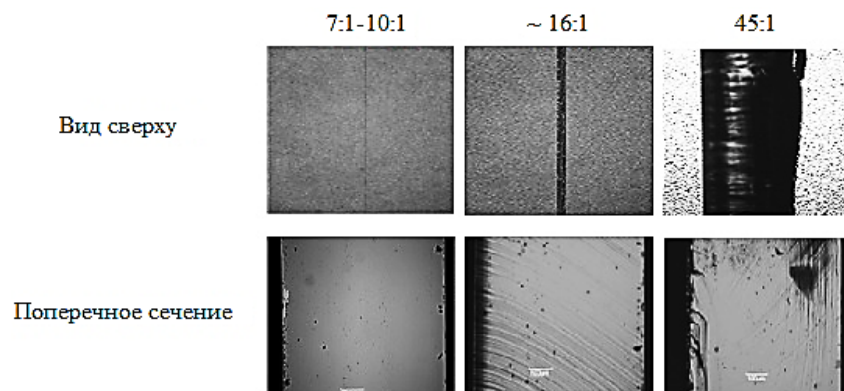


Рис. 4. Вид сверху и поперечные сечения трещин при увеличении 20х после ЛУТ при скорости 50мм/с и эллиптичностях 7:1-10:1, ~16:1 и 45:1

Экспериментальные данные по сквозному ЛУТ в зависимости от скорости сочетаются с оптимальной плотностью мощности излучения при каждой скорости резания. Эти данные прекрасно вписываются в график зависимости, как это делает кривая для оптимальной плотности излучения при каждой скорости резания (см. рис.5). Эти данные показывают четкую зависимость глубины трещинообразования от скоростного режима и плотности мощности.

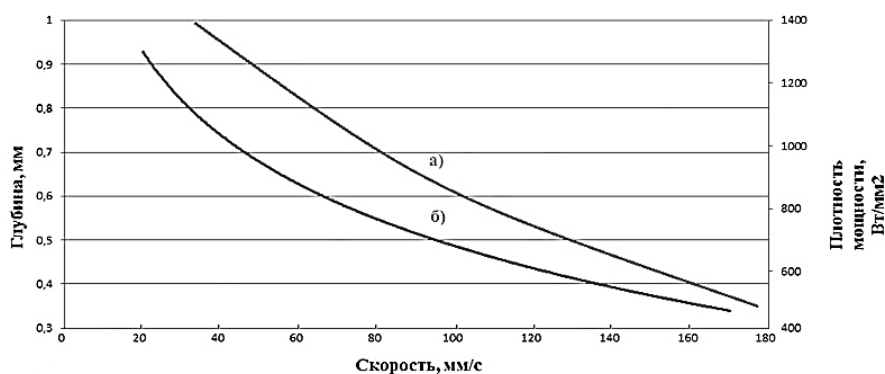


Рис. 5. Зависимость глубины трещины от: а) плотности мощности;  
б) скорости ЛУТ

Полный сквозной раскол шириной менее 1 мкм достигается с помощью одного прохода при более малой эллиптичности ~ 7:1 и большей плотности мощности 1190 Вт/мм² со средней скоростью ЛУТ 50–70 мм/сек, примерно с такой же, как и при эллиптичности 16:1 в 2–3 прохода. Так, из-за довольно малой эллиптичности пучка, применяемого в процессе, достигается форма «равенства

скорости», в которой мало или вообще нет выгоды от использования высокоскоростного, многопроходового процесса ЛУТ кремниевой пластины толщиной 725 мкм на кристаллы.

С целью определения возможности применения ЛУТ в производстве микродисплеев на основе ОСИД был проведен процесс при оптимальных параметрах и измерена яркость и цветовые координаты образцов до и после ЛУТ с помощью цветоанализатора СА-310 производства компании Konica Minolta (Япония) при подаче напряжения питания на образцы в 5 В. Эти тесты дали ответ на вопрос о возможности применения ЛУТ в технологии ОСИД, результаты представлены на рис.6, на образцах не обнаружена деградация структур, нет потери яркости и цветовые координаты остались неизменны.

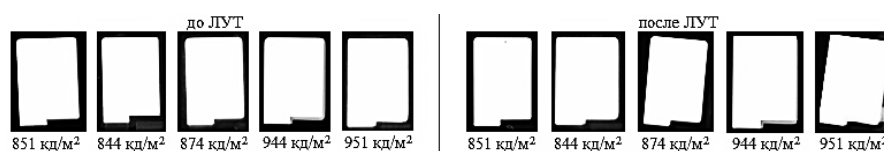


Рис. 6. Яркость тестовых образцов ОСИД до и после ЛУТ

Для количественной оценки качества торцов была измерена шероховатость поверхностей с помощью профилометра модели ХР-200 фирмы Ambios (США). Шероховатость поверхности вдоль нанесенного надреза с нерабочей стороны составила  $R_z \approx 11.207$  мкм и  $R_z \approx 0.005$  мкм вдоль середины торца и с рабочей стороны кристалла (рис. 7, а и б соответственно).

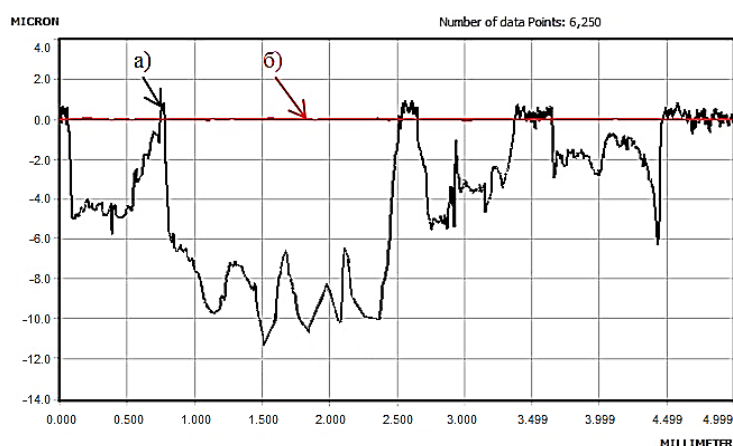


Рис. 7. Профилограммы поверхностей кромок кристаллов вдоль надреза (а),  
вдоль середины и рабочей кромки после ЛУТ (б)

### Математическая модель ЛУТ

Что бы рассчитать и построить математическую модель ЛУТ кремниевых пластин толщиной 725 мкм, следует решить дифференциальное уравнение теплопроводности, которое можно представить в виде [6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = q, \quad (1)$$

где  $\rho c$  – удельная объемная теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $T$  – температура в произвольной точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ ;  $q = f(x, y, z, t)$  – объемная плотность мощности источников тепла.

Однако решение уравнения (1) в общем виде не представляется возможным, поэтому следует использовать приближения и искать частные приближенные решения для каждого отдельного случая. В случае ЛУТ эллиптическим пучком функция  $f(x, y, z, t)$  примет вид:

$$f(x, y, z, t) = (1 - R) \frac{P\alpha}{\pi ab} \exp\left(-\frac{2(x-vt)^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{2y^2}{b^2}\right) \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

Таким образом задача теплопроводности теплоизолированной пластины, нагреваемой перемещающимся эллиптическим пучком лазера, моделируя условия термораскалывания, запишется:

$$\left\{ \begin{array}{l} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = (1 - R) \frac{P\alpha}{\pi ab} \exp\left(-\frac{2(x-vt)^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{2y^2}{b^2}\right) \exp(-\alpha z) \\ T(\vec{r}, 0) = T_0 \\ \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = \frac{h(T)(T - T_0)}{\lambda} \\ \frac{\partial T(x, y, th, t)}{\partial z} = 0 \\ T(\infty, t) = T_0 \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $R$  – коэффициент отражения;  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $P$  – мощность лазерного излучения;  $a, b$  – полуоси эллипса пятна нагрева;  $v$  – скорость перемещения;  $T_0$  – начальное



значение температуры пластины,  $h(T)$  – температурная зависимость коэффициента теплоотдачи при охлаждении поверхности пластины хладагентом (воздушно-водяная смесь),  $th$  – толщина пластины.

Для расчета распределения температуры при ЛУТ по кремниевой пластине толщиной 725 мкм при мощности лазера  $P = 250$  Вт с размерами пучка  $2a \times 2b = 1340$  мкм  $\times$  200 мкм и скорости перемещения  $v = 50$  мм/с применен метод разделения переменных [7]. Следует отметить, что трещина, следующая за лазерным пучком, проходит в плоскости симметрии нагрева и охлаждения пластины и на процессы теплопроводности влияния не оказывает, так как через плоскость симметрии тепловых потоков нет. Численное решение распределения температуры полученное методом конечных разностей в среде MathCad представлено на рис. 8.

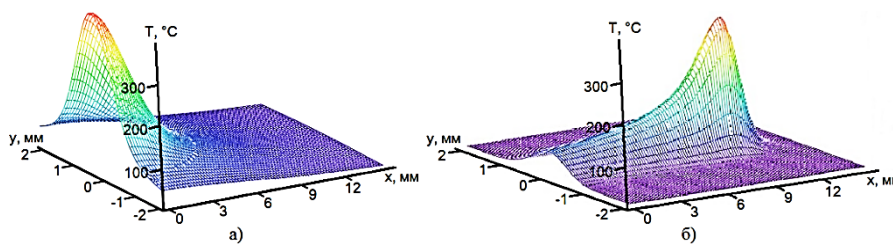


Рис. 8. Распределение температуры по поверхности кремниевой пластины во время ЛУТ при заходе лазерного пучка (а) и при нагреве без охлаждения (б)

Из рис.8 видно, что на расстоянии 1,68 мм по оси  $y$  температура не превышает  $90^\circ\text{C}$  [8]. Определить характер распределения температуры – это только часть задачи термоупругости. Далее надо определить напряжения, возникающие при таком неравномерном нагреве материала. Температурные напряжения всегда возникают при продольных температурных деформациях. Поэтому, температурные напряжения в пластине нельзя измерить датчиками деформаций, их можно определить только расчетом.

При рассмотрении двумерной модели термоупругого равновесия тонкой пластины, нагреваемой лазерным излучением и охлаждаемой вслед за пучком

хладагентом, можно считать распределение температуры по толщине пластины однородным, а неоднородности зависят только от координат  $(x, y)$ . В этом случае реализуется плоское напряженное состояние.

Частное решение для компонента  $\sigma_{yy}$  тензора напряжения имеет вид [5]:

$$\sigma_{yy} = \frac{\alpha_T E a_T}{1-\nu} \int_0^t \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} d\tau, \quad (4)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент линейного температурного расширения кремния  $a_T$  – температуропроводность.

Наибольший интерес вызывает значение  $\sigma_{yy}$  в зоне охлаждения после нагрева лазерным излучением кремниевой пластины толщиной 725 мкм (рис. 9). Потому что именно эти напряжения приводят к продвижению трещины и сквозному расколу пластины вслед за лазерным излучением.

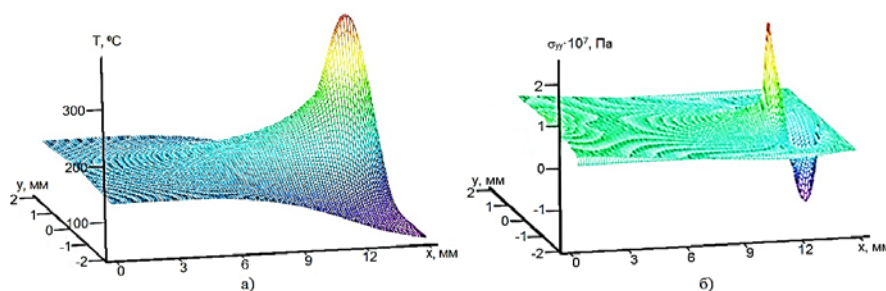


Рис. 9. Распределение температуры с подачей хладагента (а) и напряжения  $\sigma_{yy}$  (б) на поверхности кремниевой пластины в процессе ЛУТ

### Выводы

Проведенные исследования показали не только возможность, но и высокую эффективность применения лазерного управляемого термораскалывания для разделения кремниевых подложек со структурами микродисплеев на органических светоизлучающих диодах. Установлено, что при плотности мощности 1190 Вт/мм<sup>2</sup> и эллиптичности пучка ~7:1 за один проход со скоростью 50 мм/с можно получить сквозную трещину на пластине кремния толщиной 725 мкм, при этом ширина реза составит менее 1 мкм. По сравнению с традиционными методами преимущества лазерного термораскалывания кремниевых пластин заключаются в следующем:

- повышение скорости резки более чем в 50 раз по сравнению с механической алмазной резкой (1–3 мм/сек);
- повышение качества резки за счет отсутствия микротрещин и сколов;
- уменьшение шероховатости поверхности кромки пластины после ЛУТ более чем в 100 раз;
- не происходит изменения и ухудшения структуры органических светоизлучающих диодов;
- увеличение механической прочности изделий после ЛУТ в 5 раз по сравнению с традиционной технологией за счет бездефектности кромки.

### *Список литературы*

1. Г.А. Александрова, О.А. Грачев, Н.Н. Усов. Главные тенденции формирования белых высокоэффективных органических светоизлучающих диодных структур на основе маломолекулярных соединений // Материалы 19-го международного симпозиума «Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники», 28-февраля- 4 марта 2011г., Логойск, Республика Беларусь, стр.11-24.
2. Патент РФ №2024441, МКИ5 С03 В 33/02. Способ резки хрупких материалов. В.С. Кондратенко, 1991.
3. V. Kondratenko, P. Gindin, S. Tchernykh. Laser controlled thermocracking die separation technique for sapphire substrate based devices // Phys. Stat. Sol. (c) 0, №7, 2232-2235 (2003).
4. В.С. Кондратенко, В.Е. Борисовский, П.Д. Гиндин, А.С. Наумов, Сек-Джун Ли. Разработка технологии лазерного управляемого термораскалывания плоских дисплейных панелей // Приборы. №4 (58). 2005.
5. В.С. Кондратенко, П.Д. Гиндин, В.Е. Борисовский, В.Д. Колесник, А.В. Сорокин. Российские высокие технологии в производстве приборов микро- и оптоэлектроники // Интеграл. №6 (208). Москва. 2008.
6. Лазеры в технологии / Под ред. М.Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975.
7. Теория упругости / Новацкий В. Москва. Изд-во «Мир». 1975.

8. Иванов В.И. Методы резки кремниевых приборных пластин на чипы в производстве органических микродисплеев // Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №4 (23) [Электронный ресурс]-М.: Науковедение, 2014 – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN414.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.