

05;06;12

## Размерное травление кремния и диоксида кремния локализованным газовым разрядом

© А.В. Абрамов,<sup>1</sup> Е.А. Абрамова,<sup>2</sup> И.С. Суровцев<sup>2</sup><sup>1</sup> Воронежский государственный университет,  
394693 Воронеж, Россия<sup>2</sup> Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,  
394006 Воронеж, Россия  
e-mail: Abramov@niif.vsu.ru

(Поступило в Редакцию 13 августа 2004 г.)

Изучена возможность размерного травления материалов без использования масок с помощью локализованного газового разряда, геометрия которого задается топологией поверхности одного из электродов. Впервые представлены результаты травления таким способом рисунка в пленке SiO<sub>2</sub> на Si с разрешением ~ 5 μm. Определены основные параметры, влияющие на разрешающую способность процесса.

### Введение

В работе [1] нами было показано, что локализованный газовый разряд (ЛГР) можно использовать для формирования на поверхности различных материалов рисунков с требуемой топологией без использования масок. В качестве „гравера“ фактически выступает высокочастотный разряд емкостного типа. При этом на плоском электроде, расположенном над обрабатываемым материалом, предварительно задается „негативное“ изображение требуемого рисунка травления. Было установлено, что при определенном сочетании давления газа  $P$  и длины разрядного промежутка  $L$  можно добиться локализации разряда в точном соответствии с геометрией выступающих в направлении обрабатываемого материала элементов поверхности электрода. Далее в химически активной среде разряда травление происходит только под этими элементами. Вследствие чрезвычайно малой величины  $L$ , которая может быть менее 100 μm, при данном способе травления без дополнительных затрат электроэнергии можно получать плотность мощности в разряде на 4–5 порядков больше, чем в традиционных системах плазмохимического травления. Поэтому и скорость травления материалов также достигается на порядки выше. Конечно, такого рода разряд можно с успехом использовать для травления с большими скоростями материалов, как с традиционно применяемыми масками, так и с открытых поверхностей. Настоящая же работа посвящена изучению возможности применения ЛГР для размерного травления Si и SiO<sub>2</sub> без применения масок и, в частности, установлению основных факторов, влияющих на разрешенную способность исследуемого процесса.

### Оборудование и условия получения локализованного разряда

Для откачки воздуха из разрядной камеры экспериментальной установки применялся насос НВР-5Д. Возбуждающее разряд напряжение с частотой 13.56 MHz

подавалось от генератора УВ-1, конструкция которого позволяет контролировать поглощаемую нагрузкой мощность  $P_{rf}$ . Параметры топологии поверхности электрода с рисунком, а также профилей канавок травления измеряли с помощью интерферометра МИИ-4. В ходе экспериментов давление газа меняли в пределах 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> Pa. Разряд тлеющего типа равномерно и устойчиво горел под выступающими элементами поверхности электрода при  $P \times L = 2–10 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ . Эта область значений  $P \times L$  находится вблизи минимума на кривой Пашена и соответствует условиям существования нормального тлеющего разряда. Установлено, что плотность мощности в ЛГР при эффективном значении падающего на нем напряжения  $U_{rf} = 150–300 \text{ V}$  может достигать 10 kW/cm<sup>3</sup>. При этом благодаря высокой эффективности отвода тепла (вследствие малости  $L$ ) исключался перегрев газа и переход тлеющего разряда в дуговой. При указанных значениях  $P \times L$  соблюдалось соотношение  $L \approx 10\lambda_e$ , где  $\lambda_e$  — длина свободного пробега электронов. Для сравнения отметим, что в традиционных системах плазмохимического травления плотность мощности в разряде не превышает 1 W/cm<sup>3</sup> [2].

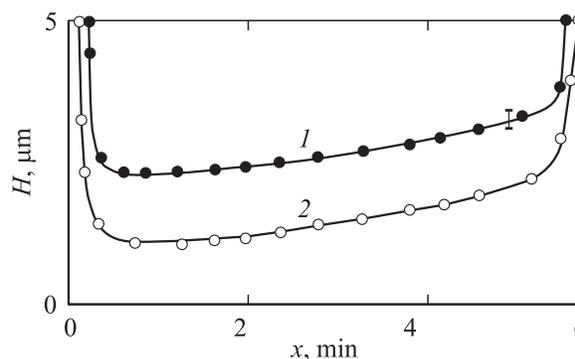
### Результаты исследований и их обсуждение

Механизм процесса травления. Исследования показали, что механизм процесса травления Si, SiO<sub>2</sub> локализованным разрядом имеет преимущественно химическую природу, как и традиционное плазмохимическое травление. Об этом свидетельствуют, например, значения селективности представляемого процесса. Так, отношение скоростей травления Si и SiO<sub>2</sub> при переходе от газа SF<sub>6</sub> к CF<sub>4</sub> изменялось от 6 до 0.5. Другим фактом, подтверждающим химическую природу рассматриваемого процесса, является изотропный характер травления Si в тех же газах, но уже проводимого через алюминиевую маску. Эксперименты по травлению Si и SiO<sub>2</sub> локализованным разрядом в аргоне показали,

что физическим распылением этих материалов можно пренебречь ввиду низкой энергии ионов, которая здесь не превышает нескольких десятков электрон-вольт. В то же время анализ результатов как экспериментов, так и моделирования свидетельствует о том, что в процессе травления локализованным разрядом Si (и особенно  $\text{SiO}_2$ ) немаловажную роль играет ионная бомбардировка как фактор активации и очистки обрабатываемой поверхности [3].

Вместе с тем исследуемый процесс имеет и существенные отличия от плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления. В первую очередь выделим чрезвычайно высокую скорость травления, которая обусловлена весьма значительной концентрацией химически активных частиц (ХАЧ) в разряде. Имеются также и не столь очевидные, но важные отличия, возникающие вследствие особых условий существования локализованного разряда. Например, при реализации указанных выше способов травления используется  $\alpha$ -форма ВЧ разряда, а ЛГР горит в переходном режиме: от ВЧ разряда  $\gamma$ -формы к разряду переменного тока. Форма его существования зависит главным образом от соотношения частоты напряжения, давления газа и межэлектродного расстояния [4]. При характерной для него напряженности электрического поля  $10^4$ – $10^5$  В/см длина дрейфового пути электронов много больше  $L$ . Разряд в этом случае горит в импульсном режиме, а катодный слой формируется в каждом полупериоде колебаний напряжения заново и попеременно у одного из электродов. Причем бомбардировка участков обрабатываемого материала ионами идет в те периоды времени, когда разряд горит у выступающих элементов поверхности противоположного электрода. Ионы ускоряются по нормали к обрабатываемой поверхности, что способствует повышению точности переноса на нее конфигурации рисунка травления, заданного на электроде. Такие особенности существования разряда способствуют локализации области протекания процесса травления. Заметим попутно, что дебаевский радиус экранирования в этих условиях соизмерим с величиной  $L$ , поэтому говорить о формировании полноценной плазмы уже неправомерно.

**Равномерность травления.** Первым необходимым условием достижения равномерного травления обрабатываемой поверхности является ее строгая параллельность плоскости электрода с рисунком. На рис. 1 показаны профили сечения ямки травления и соосного с ней цилиндрического выступа на электроде, из которого видно, что профиль ямки повторяет профиль сечения электрода. Глубина травления  $H$  оказалась больше там, где было меньше исходное расстояние между электродом и обрабатываемой поверхностью. В данном случае, начальный перепад расстояний составлял около  $2 \mu\text{m}$ . Такое влияние разброса значений  $L$  по площади разряда на равномерность травления, вероятно, обусловлено двумя причинами. Во-первых, разряд может первоначально заполнять не всю поверхность электрода, а формироваться раньше там, где меньше  $L$ , и соответственно

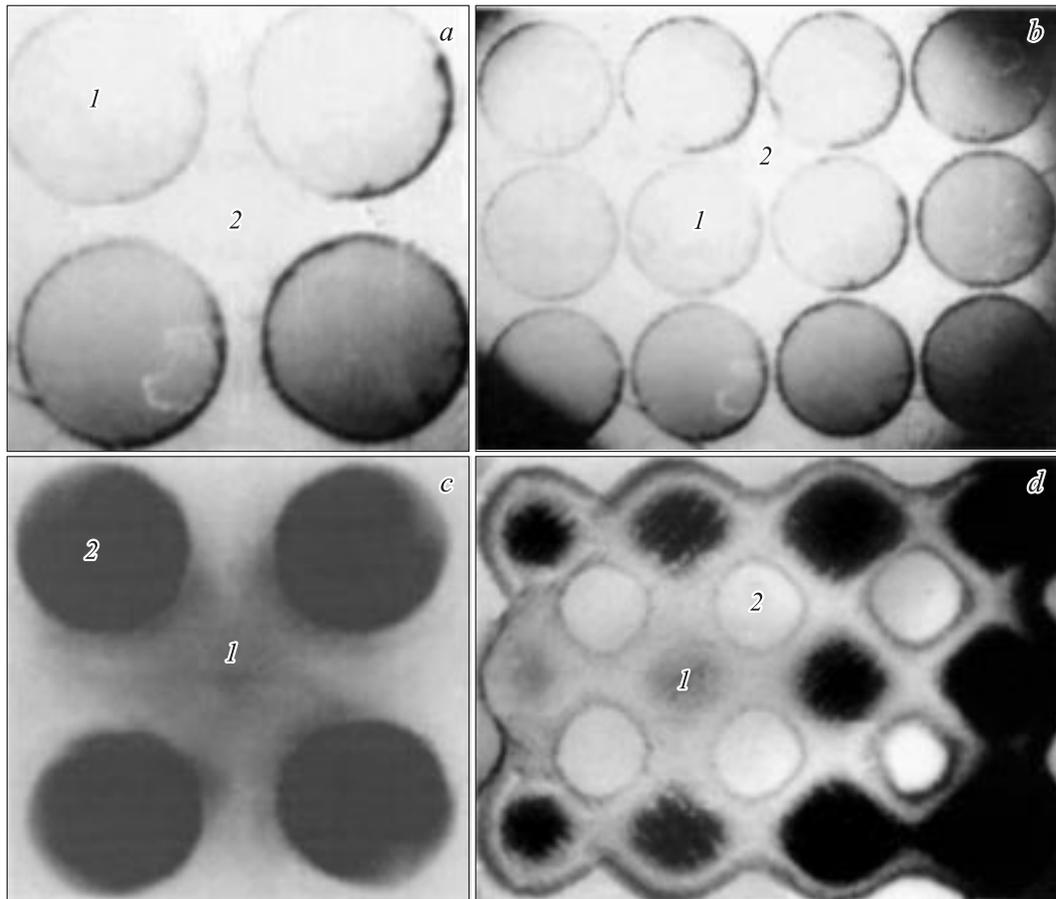


**Рис. 1.** Профили сечения элемента электрода (1) и полученной под ним ямки травления в кремнии (2). Газ  $\text{SF}_6$ ,  $P = 2 \cdot 10^4$  Па,  $P_{rf} = 30$  Вт,  $U_{rf} = 200$  В,  $L = 300 \mu\text{m}$ ,  $t = 10$  с.

время травления там будет больше. Во-вторых, при увеличении разрядного тока, когда разряд заполняет всю поверхность электрода, напряженность электрического поля, плотность заряженных частиц, а следовательно, и концентрация ХАЧ будут выше там, где меньше  $L$ . Таким образом, для достижения требуемой равномерности травления необходимо обеспечить соответствующее постоянство величины  $L$  по всей площади разряда и создать условия для поддержания однородного состава газа в нем. Стремление разряда при определенных условиях формироваться между наиболее близко расположенными друг к другу участками поверхности электрода и обрабатываемого материала позволяет проводить с его помощью выравнивание обрабатываемой поверхности. Это свойство исследуемого способа травления является еще одной его отличительной особенностью по сравнению с традиционными методами.

**Разрешающая способность.** Важнейшей характеристикой любого процесса размерного травления является его разрешающая способность. Для традиционных методов плазмохимического травления, проводимых через маску, она ограничивается, во-первых, конечной величиной показателя анизотропии процесса  $A$ , который равен отношению  $H$  к величине растрыва под маску. Во-вторых, в процессе травления может разрушаться сама маска, как вследствие химического взаимодействия с частицами плазмы, так и физического распыления. В нашем случае величину  $A$  можно определить отношением  $H$  к  $\Delta l$ , равной расстоянию от границы проекции выступающего элемента электрода на обрабатываемую поверхность до границы области травления [1]. Следует иметь в виду, что величина  $\Delta l$  фактически устанавливается с момента включения разряда и слабо зависит от времени и  $H$  (при  $H \ll L$ ). Поэтому значение  $A$  растёт с ростом глубины травления и его следует рассматривать только в неразрывной связи с определенным значением  $H$ .

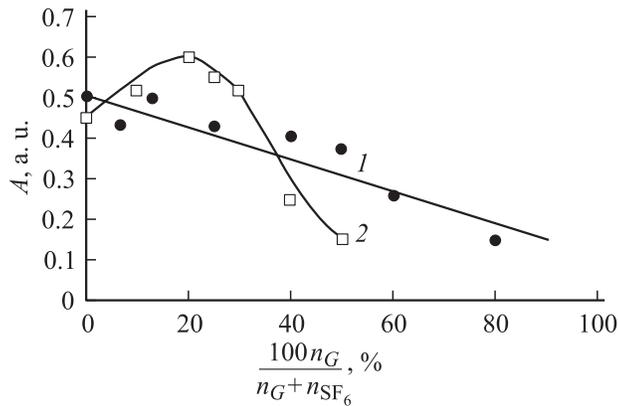
Опыты показали, что локализация разряда у выступающих элементов электрода может иметь место даже при глубине гравировки топологии рисунка на нем, много меньшей  $L$ . Так, в качестве обкладки ВЧ электрода ис-



**Рис. 2.** Участки поверхности электрода (1 — Si, 2 — Al) (a, b) и полученные под этими участками рисунки травления в пленке SiO<sub>2</sub> на Si (1 — Si, 2 — SiO<sub>2</sub>) (c, d).

пользовалась кремниевая пластина с нанесенной на нее термическим испарением пленкой Al толщиной 1 μm, в которой были протравлены периодически распределенные отверстия  $\varnothing$  60 (рис. 2, a) и 40 μm (рис. 2, b). В первом случае расстояние между соседними отверстиями в Al составляло  $\sim 10$  μm, а во втором — около 3 μm. На заземленном электроде размещалась окисленная кремниевая пластина (толщина SiO<sub>2</sub> 0.3 μm) таким образом, что расстояние между обращенными друг к другу поверхностями этих двух пластин (величина  $L$ ) составляло  $85 \pm 0.5$  μm. В результате горения разряда между пластинами в течение 1 s при  $P = 3 \cdot 10^4$  Pa в газе SF<sub>6</sub> в пленке SiO<sub>2</sub> были протравлены фигуры (рис. 2, c, d), топология которых является „негативной“ по отношению к топологии рисунка в пленке Al. Это и не удивительно: ведь разряд горел только под закрытыми алюминием участками поверхности пластины. Под каждым из отверстий  $\varnothing$  60 μm оставались дискретные участки не стравленной пленки SiO<sub>2</sub> диаметром чуть меньше 50 μm (рис. 2, c). Нетрудно убедиться, что в этом случае величина растрва составила  $\sim 5$  μm, т.е.  $\Delta l \ll L$ . Это объясняется тем, что границы травления SiO<sub>2</sub> задаются преимущественно распределением по

обрабатываемой поверхности плотности потока ионов, имеющего нормальную направленность к обрабатываемой поверхности. В целом заряженные компоненты ЛПР распределены в меньшем объеме, чем незаряженные ХАЧ, несмотря на то, что длина свободного пробега электронов больше. Дело в том, что по мере удаления от выступающего элемента электрода уменьшается напряженность электрического поля, а значит снижается энергия электронов и частота ионизации молекул. Кроме того, с уменьшением энергии электронов возрастает вероятность их прилипания к молекулам. Собственно, этот процесс и является основным препятствием разлета электронов от места их генерации. Из сравнения рис. 2, b и d видно, что при расстоянии между отверстиями в пленке Al, равном 3 μm, разрешение процесса травления оказалось недостаточным для получения адекватного „негативного“ изображения, имеющегося на электроде рисунка. Под узкими участками алюминиевой пленки за время процесса слой SiO<sub>2</sub> был стравлен не полностью. Видимо, под узкими участками пленки Al плотности идущих на обрабатываемую поверхность потоков ХАЧ и ионов из-за рассеяния оказываются недостаточными.



**Рис. 3.** Зависимость показателя анизотропии травления окисленного кремния от содержания Ar (1), O<sub>2</sub> (2) в SF<sub>6</sub>.  $P_{rf} = 20$  W,  $U_{rf} = 175$  V,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $H = 20 \mu\text{m}$ ,  $P = 3 \cdot 10^4$  Pa.

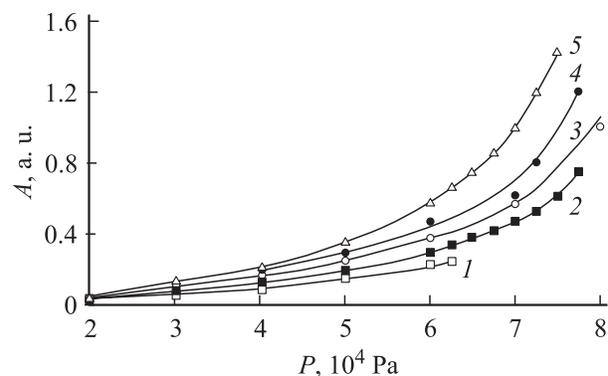
Следует заметить, что проникновение незаряженных ХАЧ за пределы области горения разряда может вызывать там протекание радикального травления. Однако ему препятствует осаждение на обрабатываемом материале труднотлетучих продуктов реакций, идущих в зоне горения разряда. Причем по мере удаления от выступающего элемента электрода маскирующее действие этих продуктов возрастает в связи с тем, что энергия и плотность потока заряженных частиц при этом снижаются и становятся недостаточными для активации и очистки поверхности обрабатываемого материала.

Сравнение профилей канавок, полученных при одинаковых режимах травления в окисленном и неокисленном кремнии, показало, что в случае окисленного Si величина  $A$  в несколько раз выше. Причем при травлении окисленного Si величина  $\Delta l$  оказывалась меньше, а  $H$  больше, чем для открытого Si. Отметим, что в этих экспериментах общее время травления образцов было много больше времени вскрытия кремния от SiO<sub>2</sub>. Тот факт, что ширина канавок травления в окисленном Si оказывается меньше, чем в не окисленном кремнии, объясняется маскирующим действием SiO<sub>2</sub>, который без ионной бомбардировки достаточной интенсивности не травится. В свою очередь, поскольку при обработке окисленного Si площадь травления оказывается меньше, концентрация ХАЧ над ним и скорость его травления выше. Кроме того, SiO<sub>2</sub> — диэлектрик, а используемый в работе разряд представляет собой разряд переменного тока. Поэтому разрядный ток является током проводимости и, вероятно, стягивался в направлении вскрытого от диэлектрика участка Si. Это обстоятельство должно приводить к дополнительной локализации разряда и к увеличению скорости травления.

Исследования зависимости  $A$  от процентного содержания в SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> добавок аргона и кислорода проводились при травлении на окисленном Si (толщина SiO<sub>2</sub> 0.72 μm) дорожек длиной 10 mm при использовании никелевого электрода шириной 100 μm. Установлено, что анизотропия травления Si повышается с ростом содержания Ar в

CF<sub>4</sub> примерно до 50%, а затем снижается. Аналогичная зависимость имеет место и в смеси SF<sub>6</sub> с аргоном, но максимальное значение  $A$  наблюдается примерно при 20% Ar (рис. 3). Такой результат объясняется тем, что добавка аргона к фторсодержащему газу меняет соотношение потока положительных ионов и ХАЧ в пользу первых, что в свою очередь приводит к повышению роли ионной бомбардировки как фактора роста анизотропии травления. При содержании аргона в смеси более 20% величина  $A$  начинает уменьшаться, так как объем разряда увеличивается за счет снижения вероятности электронного прилипания. При добавлении кислорода в SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> показатель анизотропии травления падает практически линейно, что связано с образованием в разряде долгоживущих кислородсодержащих соединений, например COF<sub>2</sub>, OF<sub>2</sub> и др., имеющих значительно меньшие энергии диссоциации по сравнению с исходными молекулами фторсодержащих газов [5,6]. Диссоциация этих соединений может происходить на гораздо большем удалении от выступающего элемента электрода, т.е. в тех областях пространства, где напряженность электрического поля и температура электронов ниже. Кроме того, эти соединения могут разлагаться на поверхности кремния в результате диссоциативной хемосорбции. Добавка кислорода к фторсодержащим газам может и непосредственно увеличивать время жизни образующихся в них ХАЧ, замедляя скорости их реакций с другими частицами путем их окисления [7].

На рис. 4 представлена зависимость  $A$  от  $P$  при травлении окисленного Si (толщина SiO<sub>2</sub> 3 μm) при  $H = 10 \mu\text{m}$ , из которой видно, что анизотропия повышается с ростом  $P$ . Подобная же зависимость была ранее получена нами при травлении неокисленного Si [1]. Эти результаты можно объяснить тем, что концентрация электронов в разряде слабо зависит от давления, а коэффициент их диффузии уменьшается обратной пропорционально  $P$ . Кроме того, с ростом  $P$  снижается энергия электронов, что ведет к повышению вероятности прилипания их к молекулам и также способствует



**Рис. 4.** Зависимость показателя анизотропии травления окисленного Si от давления газовой смеси.  $U_{rf} = 170$  V,  $P_{rf} = 25$  W,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $H = 10 \mu\text{m}$ . CF<sub>4</sub> (1), CF<sub>4</sub> + 10% Ar (2), CF<sub>4</sub> + 20% Ar (3), CF<sub>4</sub> + 30% (4), CF<sub>4</sub> + 40% (5).

локализации разряда в меньшем объеме. Здесь следует иметь в виду, что увеличить анизотропию травления путем повышения  $P$  можно лишь до тех пор, пока тлеющий разряд не перейдет в дуговой. А поскольку увеличение давления при фиксированном  $L$  приводит к росту напряжения пробоя, то с ростом  $P$  необходимо одновременно уменьшать расстояние между электродами.

При одинаковых режимах травления Si локализованным разрядом в SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> благодаря действию электронного прилипания величина  $\Delta l$  в SF<sub>6</sub> примерно в 2–3 раза меньше.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что с помощью ЛПР можно проводить размерное травление материала без использования масок, что в принципе позволяет исключить из техпроцесса этап литографических операций. Установлено, что разрешающая способность травления повышается с ростом давления и электроотрицательности газа, а также с уменьшением длины разрядного промежутка. Кроме того, разрешающую способность травления можно существенно улучшить путем оптимизации вклада ионной бомбардировки в исследуемый процесс. Это достигается за счет правильного выбора состава плазмообразующего газа, а также учета физико-химических свойств обрабатываемых материалов. Таким образом, проведенные исследования позволили установить основные факторы, влияющие на разрешающую способность травления материалов локализованным разрядом. Учитывая возможность дальнейшего улучшения характеристик исследуемого процесса, а также его чрезвычайно высокую производительность, можно предположить перспективность его применения в различных отраслях производства.

Работа выполнена в рамках проекта 04.01.18. подпрограммы „Электроника“ научно-технической программы Министерства образования Российской Федерации „Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники“ (2003–2004 г.).

## Список литературы

- [1] Абрамов А.В., Абрамова Е.А., Суровцев И.С. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 3. С. 45–48.
- [2] Данилин Б.С., Киреев В.Ю. // Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 264.
- [3] Абрамов А.В., Абрамова Е.А., Дикарев Ю.И. и др. // Сб. науч. тр. „Математическое моделирование ИТС“. Воронеж: ВГТА, 2002. Вып. 5. С. 96–100.
- [4] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. // Высоковольтный емкостной разряда: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Изд-во Московского физ-техн. ин-та, 1995. С. 320.
- [5] Mogab C.L., Adams A.C., Flamm D. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N 7. P. 3796–3803.

- [6] Дикарев Ю.И., Светцов В.И. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1983. Вып. 10 (183). С. 41–44.
- [7] Владимирова Л.Н., Дикарев Ю.И., Цветков С.М. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4. № 1. С. 79–83.