

Формирование двумерных структур фотонных кристаллов в кремнии для ближнего ИК диапазона с использованием остросфокусированных ионных пучков

© А.Ф. Вяткин, Е.Ю. Гаврилин, Ю.Б. Горбатов, В.В. Старков, В.В. Сироткин

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: Vyatkin@ipmt-hpm.ac.ru

Одним из двух вариантов реализации двумерных фотонных кристаллов в кремнии являются упорядоченные структуры макропор в кремниевой подложке. Характерные размеры пор — диаметр и толщина стенок между порами — определяют диапазон длин волн, в котором такая структура проявляет свойства фотонного кристалла. Для ближнего ИК диапазона эти размеры приближаются к одному микрону и даже уходят в субмикронную область. В настоящей работе попытка формирования упорядоченной структуры макропор с такими размерами предпринята с использованием остросфокусированных ионных пучков для стимулирующего воздействия имплантированных ионов на процесс зарождения пор в заданных местах поверхности кремниевой подложки. Показано, что уже при малых дозах ионной имплантации (2×10^{13} ион/см²) происходит зарождение пор в местах ионного облучения. Предложена модель, описывающая ориентирующее влияние ионного облучения на зарождение пор.

В качестве элементной базы микро- и нанофотоники фотонные кристаллы представляются чрезвычайно перспективными материалами, особенно в области ближнего ИК диапазона, используемого для приборов современных средств коммуникации. Фотонные кристаллы на основе кремния в этом ряду занимают исключительно важное место потому, что использование кремния и его высокоразвитой микроэлектронной технологии дает возможность реализовать системные приборные решения, когда на одном чипе размещаются и микроэлектронные, и оптические схемы.

Двумерные фотонные кристаллы в кремнии — это упорядоченные структуры макропор на кремниевой подложке. Характерные размеры пор — диаметр и толщина стенки между порами — определяют диапазон длин волн, в котором может работать такая пористая структура. Для ближнего ИК диапазона эти размеры приближаются к $1 \mu\text{m}$ или уходят в субмикронную область [1]. Формирование упорядоченного макропористого кремния с такими размерами пор представляет значительные трудности для обоих используемых сегодня методов получения макропористого кремния с порами с высоким аспектным отношением: плазмо-химическое травление через маски и электрохимическое глубокое анодное травление. Также известно, например, что ионное облучение поверхности пластины кремния *n*-типа ионами бора приводит к блокировке процесса анодного травления в облученных местах [2], что связывалось с инверсией типа проводимости в этих областях.

В настоящей работе предпринята попытка найти новое решение этой сложной задачи, базирующееся на использовании остросфокусированных ионных пучков для стимулирующего воздействия имплантированных ионов на процесс зарождения пор в заданных местах поверхности кремниевой подложки. Поскольку ионные пучки могут быть сфокусированы до нанометровых

размеров, можно ожидать, что их применение позволит решить сформулированную выше задачу формирования фотонных кристаллов для ближнего ИК диапазона.

1. Эксперимент

Ранее нами было показано [3], что процесс анодного травления кремния — это двухстадийный процесс, включающий в себя стадию зарождения и начального развития поры и стадию роста поры. Если параметры процесса анодного травления, такие как плотность тока и напряжение, состав электролита, температура проведения процесса, определяют скорость роста пор, то плотность зарождающихся пор определяется процессами, механизм которых не установлен до настоящего времени. В настоящей работе на первом этапе с использованием установки с остросфокусированным ионным пучком на поверхности кремния создавалась упорядоченная структура имплантированных областей. Затем такая облученная пластина кремния подвергалась процессу глубокого анодного травления.

Для экспериментов использовались пластины кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $5\text{--}8 \Omega\text{cm}$ и ориентацией поверхности (100). Энергия однозарядных ионов галлия составляла 25 keV. Диаметр ионного зонда на образце равнялся 100 nm, плотность тока составляла около 1 A/cm^2 . Экспонирование структур проводилось путем перемещения пучка ионов по поверхности образца с помощью компьютерной программы PROXY. Доза экспонирования определялась временем выдержки пучка в точке и изменялась от $2 \cdot 10^{13}$ до $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. При этом наибольшее значение дозы выбиралось из соображений наименьшего распыления поверхности в местах воздействия ионов (наибольшая величина распыленного слоя при дозе $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ не

превышает согласно расчетным данным 0.5 nm). Наименьшее значение величины дозы определялось техническими возможностями установки и составляло величину $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. При этом минимальное время экспозиции в одной точке равно $10 \mu\text{s}$. Размер экспонируемых ионным зондом участков составлял 100 nm , а расстояние между центрами этих областей изменялось от 1 до $5 \mu\text{m}$. Процесс глубокого анодного травления проводился при комнатной температуре в растворе плавиковой кислоты в диметилформамиде (DMF) в объемных соотношениях $\text{HF}:\text{DMF} = 1:9$ при плотности тока травления $9 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Глубина травления, геометрические размеры пор, а также расстояние между порами определялись по оптическому и электронно-микроскопическим изображениям шлифов планарной части и поперечного скола пластины в упорядоченных и неупорядоченных областях образца.

2. Результаты

Глубокое анодное травление образцов кремния, подвергнутых предварительному облучению ионами галлия, показало, что зарождение пор происходит только в облученных местах. При травлении образцов с различной величиной дозы имплантации не было установлено существенной зависимости формирования пор от дозы облучения для всего диапазона исследованных доз. Оптическая фотография поверхности образцов с сформированной системой упорядоченных пор представлена на рис. 1. Видно, что происходит упорядоченное образование макропор в кремнии в области, предварительно экспонированной остросфокусированным ионным пучком с периодом $2.4 \mu\text{m}$ (левая часть рис. 1).

Увеличение шага экспонирования приводит к тому, что, начиная с некоторых его значений, в результате глубокого анодного травления кремния поры формируются не только в имплантируемых областях, но и между ними, т.е. проявляется так называемый „эффект близости“, описанный в работе [3]. Уменьшение значения шага экспонирования до $1 \mu\text{m}$ приводит к тому, что часть проимплантированных областей выпадает из ансамбля растущих пор, т.е. часть образовавшихся на начальной стадии травления пор с межцентровым расстоянием $1 \mu\text{m}$ перестает развиваться при дальнейшем проведении процесса глубокого анодного травления. При этом межцентровое расстояние стремится к значению $2.4 \mu\text{m}$. Следует отметить, что расстояние между центрами пор, равное $2.4 \mu\text{m}$, характерно для самопроизвольного неоднородного глубокого анодного травления образца кремния с такой же величиной удельного сопротивления (правая часть рис. 1).

Иницирующее влияние ионного облучения на процесс зарождения пор проявляется, однако, только в том случае, когда глубина легирования кремния примесью галлия превышает некоторую критическую величину. При имплантации ионов галлия с энергией 25 keV весь

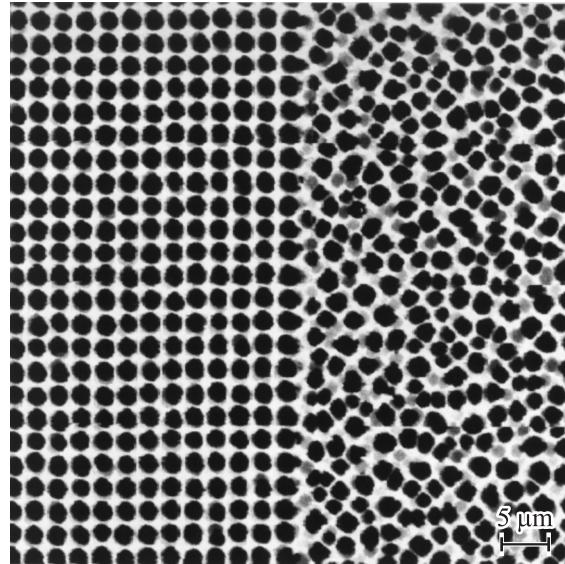


Рис. 1. Оптическая фотография поверхности пластины кремния, подвергнутой глубокому анодному травлению.

профиль легирующей примеси укладывается в глубине кремниевой подложки $\sim 50 \text{ nm}$. Если же ионное облучение проводить через слой окисла толщиной $\sim 20 \text{ nm}$, что фактически означает уменьшение глубины легирования, то стимулирующее воздействие ионного облучения нивелируется и процесс зарождения и роста пор происходит самопроизвольно и неупорядочено.

3. Обсуждение результатов

Ориентирующее влияние сфокусированного ионного пучка на формирование упорядоченной структуры пор можно понять, если процесс электрохимического травления представить протекающим по следующей схеме. Процесс электрохимического травления кремния, сопровождающийся образованием макропор, как однозначно установлено, происходит при некотором недостатке носителей заряда, поставляемых в место протекания электрохимической реакции. Поэтому на начальной стадии процесса травления реализуется в первом атомном слое кристалла в некоторых особых „слабых“ местах, например, в местах расположения легирующей примеси. Удаление атома из первого слоя обеспечивает более облегченные условия для травления соседних атомов первого слоя кристалла. Процесс продолжается в первом слое до тех пор, пока во втором слое не откроется атом легирующей примеси. В этот момент процесс травления распространяется и на второй атомный слой кристалла. Далее процесс повторяется на третьем и последующих слоях. При этом очевидно, что не все центры зарождения пор имеют равную скорость распространения в глубь кристалла, так как для каждой зародившейся поры существует разная вероятность встречи атома ле-

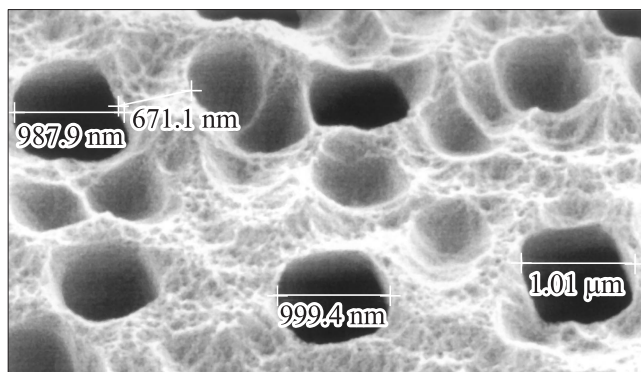


Рис. 2. Изображение поверхности кремниевой пластины в сканирующем электронном микроскопе после проведения процесса глубокого анодного травления в условиях самопроизвольного зарождения пор.

гирующей примеси в последующем слое. Это приводит к тому, что только некоторая часть зародившихся пор имеет шанс распространиться в глубь кристалла.

Такое представление о процессе электрохимического травления позволяет создать компьютерную модель процесса. Физические принципы, положенные в ее основу, перечислены далее.

1) Формирование макропор в кремнии происходит при недостатке носителей заряда на межфазной границе кремний–электролит, поэтому процесс травления кремния начинается только в выделенных местах на поверхности пластины.

2) Предполагается, что такими местами являются места, в которых локализована примесь.

3) Уход примеси в раствор электролита (травление примеси) открывает возможность распространения процесса травления кремния с заметной скоростью в латеральном направлении в слое, из которого ушла примесь.

4) При достижении латеральным фронтом травления кремния места, в котором локализована примесь во втором слое, процесс моментально переходит во второй слой. Процесс травления кремния далее распространяется в латеральном направлении во втором слое. При этом скорость латерального движения фронта травления равна скорости латерального травления в первом слое до тех пор, пока не происходит образования двухатомной ступени. Скорость латерального травления двухатомной ступени принимается меньшей на порядок величины по сравнению со скоростью латерального травления монокатомной ступени.

5) При открытии примеси в третьем слое процесс травления переходит в третий слой и т.д. При этом скорость латерального травления трехатомной ступени и каждой последующей ступени принимается на порядок меньшей предыдущей.

6) Такой сценарий развития событий справедлив только до некоторой глубины травления поры в кремнии, т.е. только для начальной стадии процесса травления. Как только достигается момент, когда все носители заряда, поставляемые на межфазную границу кремний–электролит, концентрируются на дне сформированных пор, процесс травления переходит в стадию роста пор и его параметры определяются другими характеристиками: плотность тока, напряжение смещения, состав электролита, температура в системе кремний–электролит.

Следствием предложенной модели является тот факт, что не все примесные центры на поверхности пластины кремния будут являться источниками формирующихся пор. Выжить, т.е. сформировать пору, распространяющуюся в объем кремния, смогут только поры, зародившиеся от примесного атома на поверхности пластины, для которого вероятность встречи примесного атома в каждом последующем слое в направлении, перпендикулярном поверхности, выше некоторой критической, зависящей от концентрации примеси в кристалле крем-

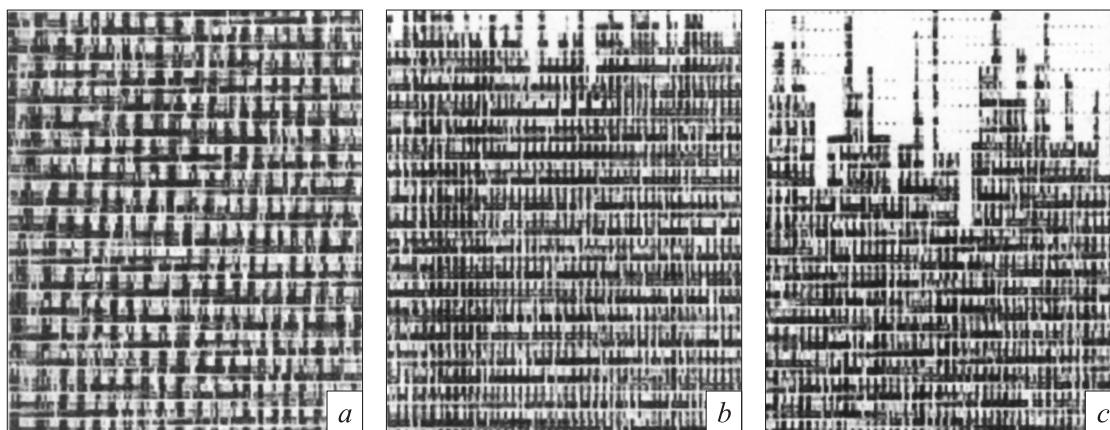


Рис. 3. Двумерное представление трех последовательных стадий развития процесса глубокого анодного травления: начальная стадия (a); стадия, когда фронт травления достиг 10-го монослоя кристалла (b); и стадия, когда фронт травления достиг 20-го монослоя (c). Светлые символы — атомы примеси, темные символы — атомы кремния.

ния. Это значит, что на поверхности пластины кремния при неупорядоченном самопроизвольном формировании пор будет наблюдаться ансамбль неразвившихся пор (кратеров) с небольшим количеством пор, уходящих в глубь пластины кремния. Такой результат действительно наблюдается на реальных пластинах кремния, подвергнутых анодному травлению (рис. 2). Этот же результат предсказывает описанная выше модель (рис. 3).

4. Выводы

1) Показано, что техника, базирующаяся на использовании острогофокусированных ионных пучков может быть использована для формирования упорядоченных структур макропор в кремнии.

2) Предложена модель, описывающая начальную стадию формирования макропор в кремнии и заключающаяся в том, что имплантация из острогофокусированного ионного пучка приводит к локальному увеличению концентрации в облученной области и, следовательно, к увеличению вероятности встречи атома примеси в каждом последующем слое в этой области, что в соответствии с моделью обеспечивает распространение поры в объем кремния в данном месте.

3) Качественное соответствие предсказаний модели и экспериментальных результатов указывает на справедливость основных положений модели.

Список литературы

- [1] T.F. Krauss, R.M. De La Rue. *Progr. Quantum. Electronics* **23**, 51 (1999).
- [2] E.V. Astrova, T.N. Vasunkina. *Semiconductors* **36**, 5, 564 (2002).
- [3] A. Vyatkin, V. Starkov, V. Tzeitlin, H. Presting, J. Konle, U. Konig. *J. Electrochem. Soc.* **149**, 1, G7 (2002).