

06;12

## **Усилитель электронного потока на кремниевых решетках, покрытых алмазной пленкой**

© М.Э. Белоусов, Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Н.К. Матвеева,  
П.В. Минаков, Г.Н. Петрухин, Р.М. Набиев, Г.С. Рычков

Научно-исследовательский институт физических проблем  
им. Ф.В. Лукина, Москва  
Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского  
государственного университета, Москва  
E-mail: polt@niifp.ru, mstlena2@mail.ru

*Поступило в Редакцию 27 сентября 2011 г.*

Известно, что алмазные мембраны могут усиливать электронный поток. При размерах мембраны более  $10 \text{ mm}^2$  из-за напряжений, которые возникают при росте алмазных пленок, мембрана деформируется и провисает. Чтобы избежать этого нежелательного эффекта, предлагается формировать усилитель электронного потока на кремниевых решетках, покрытых алмазной пленкой. Обсуждается вопрос об использовании рассматриваемых решеток вместо микроканальных пластин, особенно для случая, когда предлагаемые решетки могут непосредственно выполнять роль детекторов рентгеновских лучей, ультрафиолетового излучения и протонов.

Известно, что тонкие пористые алмазные мембраны могут быть использованы для усиления электронного потока, передающего изображение в виде плотности электронов [1,2]. Примером такого электронного потока является электронный поток, генерируемый фотокатодом в электрооптических преобразователях.

Алмазные мембраны как усилители электронного потока могут найти широкое применение в приборах ночного видения, экспериментальной физике, аэрокосмической технике, атомной технике, астрономии и биологии. Более того, алмаз способен эмиттировать электроны под действием рентгеновских лучей, ультрафиолетового излучения и протонов [3–5]. Последнее позволяет изображение, передаваемое этими излучениями, непосредственно перевести в электронный поток

с последующим его усилением, т.е. в этом случае алмазные пленки можно использовать как координатно-чувствительные детекторы.

Для практического использования алмазных мембран требуются разнообразные их конфигурации при размерах от 0.1 до 4 см<sup>2</sup>. Недостатком выращенных на поверхности кремния методом CVD алмазных мембран толщиной 3–5 μm является то, что при из размерах, превышающих несколько миллиметров, они провисают и деформируются. Чтобы избежать этого недостатка, можно использовать кремниевые мембраны, технология изготовления которых была отработана для рентгеношаблонов [6]. В этом случае сначала формируется кремниевая мембрана толщиной 2–10 μm, в ней отверстия соответствующего размера и затем на поверхность мембраны осаждается алмазная пленка.

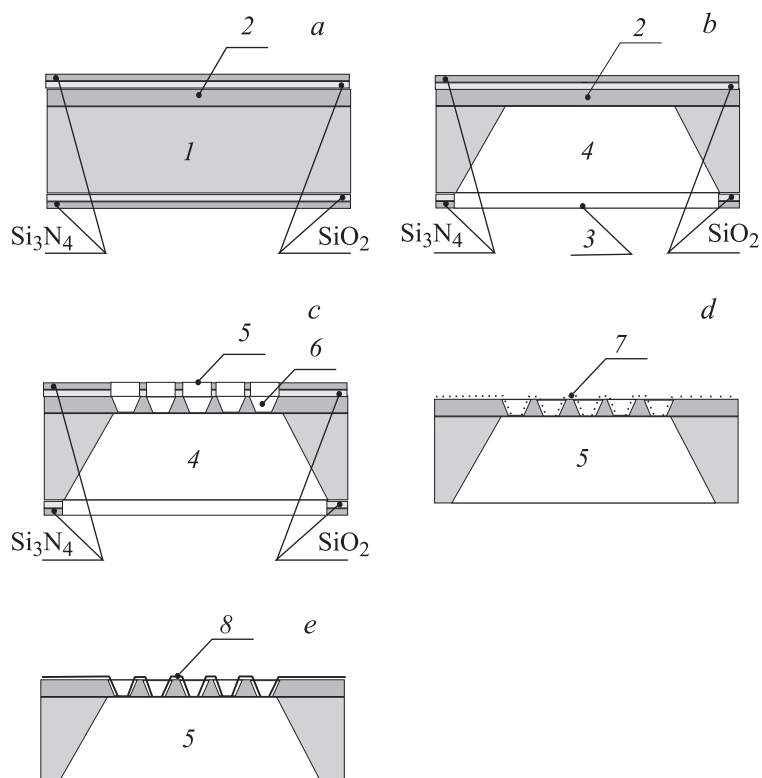
В работе [7] рассмотрен усилитель-концентратор электронного потока (УКЭ), который не только усиливает поток электронов, но и концентрирует их. Расчеты и эксперименты показывают, что плотность тока в этом случае можно увеличить в 20–100 раз. УКЭ представляет полость в форме усеченной пирамиды, стенки которой покрыты алмазной пленкой. Представляется целесообразным сформировать отверстия в кремниевой мембране в виде УКЭ. В этом случае мембрана превращается в решетку.

Данная работа посвящена разработке технологии изготовления усилителей электронного потока на основе кремниевых решеток, покрытых алмазной пленкой (КРАП), причем отверстия в решетке представляют ячейки УКЭ.

Процесс изготовления КРАП можно представить в виде следующих основных технологических операций.

1. В кремниевой пластине 1 с двухсторонней полировкой на ее лицевой стороне формируется слой 2 с концентрацией доноров или акцепторов  $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя  $d$  определяется входным размером ячейки УКЭ  $W$  и составляет  $d \approx 0.25W \text{ tg } 54.7^\circ$ . На обе стороны пластины последовательно наносятся слои SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 0.3 и 0.1 μm соответственно (рис. 1, а).

2. На обратной стороне пластины в слоях SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> фотолитографически формируется окно 3, через которое осуществляется анизотропное электрохимическое стоп-травление кремния в растворе КОН. При достижении  $p-n$ -перехода процесс травления автоматически заканчивается. В результате травления образуется полость 4 в форме усеченной пирамиды, а слой 2 превращается в однородную по толщине (разброс не более 1%) мембрану (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Технология изготовления КРАП: *a* — формирование в кремниевой пластине высоколегированного слоя 2 и напыление слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; *b* — формирование полости 4 через окно 3 в слоях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; *c* — формирование в мембране 2 отверстий 6 через окна 5; *d* — посев 7 нанокристаллического алмаза; *e* — рост поликристаллической алмазной пленки 8.

3. На лицевой стороне пластины в слоях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с помощью литографии (фото или электронной) сначала вскрываются окна 5, а затем производится селективное травление мембраны. В результате в мембране образуются сквозные отверстия 6 в форме усеченных пирамид (рис. 1, *c*).

4. После удаления  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  производится посев 7 нанокристаллического алмаза на поверхность пластины со стороны ее лицевой

поверхности. Для стимуляции роста алмазной пленки можно также использовать и имплантацию ионов углерода (рис. 1, *d*).

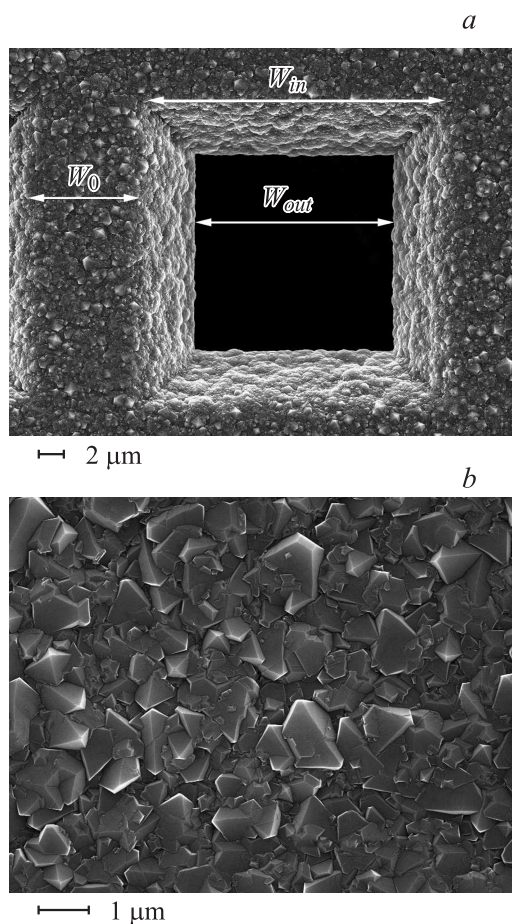
5. После этого методом CVD производится рост легированной бором поликристаллической или нанокристаллической алмазной пленки  $\delta$  (рис. 1, *e*).

На основе рассмотренной технологии при использовании обычных средств микроэлектроники были изготовлены КРАП на мембране толщиной  $\sim 6 \mu\text{m}$ . Снимки КРАП на электронном микроскопе со сформированными в ней ячейками УКЭ представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* четко видна геометрия УКЭ. Вся лицевая поверхность усилителя, включая стенки УКЭ, покрыта поликристаллическим алмазом, легированным бором (рис. 2, *b*). Размер входного отверстия УКЭ  $W_{in}$  равен  $24 \mu\text{m}$ , а выходного  $W_{out} = 16 \mu\text{m}$  (рис. 2, *a*). Входные отверстия разделены дорожками шириной  $W_0 = 8 \mu\text{m}$ .

В работе [7] размеры входного и выходного отверстий относятся как  $W_{in}/W_{out} = 2$ . При этом отношении и толщине мембраны  $d$  входное отверстие УКЭ будет иметь размеры  $W_{in} = 4d/\text{tg } 54.7^\circ$ . Полагая  $d = 2 \mu\text{m}$ , получим  $W_{in} \approx 5.7 \mu\text{m}$ . В этом случае при  $W_0 = 0$  плотность УКЭ составит более  $3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ . Эта плотность больше, чем плотность микроканалов диаметром  $4 \mu\text{m}$  в самой современной микроканальной пластине F4655-13 фирмы Hamamatsu Photonics [8]. Поскольку предлагаемые КРАП можно использовать вместо микроканальных пластин (МКП), то следует отметить те достоинства КРАП, которые и дают возможность осуществить такую замену.

1. В электронно-оптических преобразователях, в частности приборах ночного видения, наличие тяжелых ионов резко уменьшает как выход годных, так и срок их последующей эксплуатации. Обычно он не превышает 1000 h, хотя есть сообщения о сроке, достигающем до 10 000 h. Наряду с остаточным газом, ионы рождаются за счет бомбардировки электронов и ионов поверхности МКП. В КРАП поверхность мембраны покрыта алмазом, что резко снижает вероятность выбивания с поверхности атомов углерода. Кроме того, ионы проходят через МКП со стороны экрана в область катода. Вероятность прохождения определяется коэффициентом прозрачности. Для МКП он составляет 0.5–0.6. В КРАП для ионов, идущих от экрана к катоду, он равен  $(W_{out}/W_{in})^2$ , т. е. 0.25.

2. Для получения усиления  $\sim 10^6$  используют несколько МКП, расположенных последовательно. Поскольку диаметр в микроканале



**Рис. 2.** Снимки на электронном микроскопе кремниевой решетки, покрытой алмазной пленкой: *a* — основные размеры отверстий, сформированные как ячейки усилителя — концентратора потока электронов; *b* — поликристаллическая алмазная пленка, легированная бором.

МКП не меняется, а расположение входных отверстий имеет разброс, то электроны, выходя из одного микроканала, могут попасть в два смежных канала следующей МКП. В силу этого происходит размытие изображения. Так, при использовании трех МКП F4655-13 четкость

может снизиться со 150 линий на миллиметр до 50 линий. В КРАП входные отверстия УКЭ формируются с точностью до долей микрона, а выходные отверстия по площади в несколько раз меньше входных. Это позволяет направлять весь поток с выхода УКЭ предыдущей КРАП точно на вход УКЭ последующей КРАП. Таким образом, сколько бы ни было использовано КРАП, размытия изображения не будет.

3. Воздействие рентгеновских лучей, ультрафиолетового излучения и протонов на алмазную пленку, покрывающую стенки УКЭ, приводит к рождению вторичных электронов. Таким образом, усилитель для этого вида излучений может непосредственно осуществлять координатное детектирование с последующим усилением вторичных электронов.

4. МКП с микроканалами менее  $10\ \mu\text{m}$  стоят очень дорого. В основном используются МКП с каналами  $12\text{--}15\ \mu\text{m}$ . Такие МКП фирмы Del Mar Photonics, Inc. [9] стоят 1–3 тысячи долларов. Предлагаемые КРАП могут стоить намного дешевле, так как при их изготовлении используется групповая технология микроэлектроники. Для роста алмазной пленки можно использовать соответствующую установку, например установку типа AX фирмы Seki Technotron, обеспечивающую рост пленки на подложках диаметром  $100\ \text{mm}$  [10], на каждой из которых формируется до 24 КРАП размером  $15 \times 15\ \text{mm}^2$ .

Поскольку кремниевые мембраны могут иметь толщину менее  $1\ \mu\text{m}$ , то плотность УКЭ можно довести до  $10^7\ \text{cm}^{-2}$ . Такую плотность микроканалов в МКП сейчас получить почти невозможно. Однако при такой плотности следует использовать нанокристаллический алмаз, кристаллы которого имеют размеры  $5\text{--}10\ \text{nm}$ .

Итак, в работе рассмотрена технология создания усилителя потока электронов на основе кремниевой решетки, покрытой алмазной пленкой. Показана перспективность этой технологии, хотя некоторые оценки (касающиеся максимальных размеров КРАП, стоимости, минимальных размеров УКЭ и др.) нуждаются в дальнейшем уточнении. Исследования КРАП будут продолжены и полученные результаты опубликованы.

## Список литературы

- [1] Гаврилов С.А., Дзбановский Н.Н., Ильичев Э.А., Рычков Г.С. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 1. С. 108–114.
- [2] Dvorkin V.V., Dzbanovsky N.N., Suetin N.V., Rychkov G.S. et al. // Diamond Relat. Mater. 2003. V. 12. P. 2208–2218.

- [3] *Kalish R. et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. Issue 1. P. 46–48.*
- [4] *Tremsin A.S., Siegmund O.H.W. // Diamond Relat. Mater. 2005. V. 14. P. 48–53.*
- [5] *Cholewa M. et al. // Nucl. Instrum. & Meth. 2007. Meth. B 254. P. 55–58.*
- [6] *Betz H., Huber H.-L., Pongratz S. et al. // Microelectronic Engineering. 1986. V. 5. Issues 1–4. P. 41–49.*
- [7] *Пичев Е.А., Кuleshov А.Е., Poltoratskii Е.А., Rychkov G.S. // Diamond Relat. Mater. 2011. V. 20. P. 23–25.*
- [8] *Каталог фирмы:*  
<http://www.hamamatsu.com/en/products/electron-tubedivision/detectors/microchannel-platchs-mcps.php?src=hp>
- [9] *Каталог фирмы:*  
[http://www.dmp Photonics.com/MCP\\_MCPImagcIntensifiers/index.htm](http://www.dmp Photonics.com/MCP_MCPImagcIntensifiers/index.htm)
- [10] *Каталог фирмы*  
<http://www.sekitech.bir/product/DiamondCVD/MicroCVD/productline/html>