

04;07

Возбуждение взрывчатых превращений в энергонасыщенных соединениях на основе нанопористого кремния с помощью полупроводниковых быстродействующих ключей и энерговыделяющих элементов

© Г.Г. Савенков^{1,3}, А.Ф. Кардо-Сысоев², А.Г. Зегря²,
И.А. Оськин³, В.А. Брагин³, Г.Г. Зегря²

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург

³ НПО „Поиск“, п. Мурино, Ленинградская обл.
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2017 г.

Представлены первые результаты по инициированию взрывчатых превращений в энергонасыщенных соединениях на основе нанопористого кремния при помощи электрического взрыва полупроводникового мостика. Полученные результаты свидетельствуют о том, что энергетические параметры взрывчатого превращения зависят от массы горючего — нанопористого кремния — и типа легирования кремния.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.19.45082.16919

Известно, что инициирование взрывчатых превращений (горения и взрыва) в нанопористом кремнии или в энергонасыщенном соединении (ЭС) на его основе может осуществляться термически, механически, пропусканием высоковольтного импульса тока [1–3], с помощью микродетонаторов, а также с помощью лазерного излучения [3]. В то же время нанопористый кремний является типичным полупроводником и может управляться кодовым сигналом, и поэтому вполне логичным выглядит его использование в различных миниатюрных носителях информации

и логических схемах микроэлектронных устройств в качестве самоуничтожающихся кремниевых чипов [2].

В этом случае в рамках полупроводниковой технологии перспективным является применение в качестве инициатора горения или взрыва энергии, выделяющейся при взрывном испарении так называемого полупроводникового мостика, на который подается через полупроводниковый ключ энергия из емкостного накопителя. Перспективность применения заключается в том, что в образовавшихся под воздействием введенной энергии парах кремния при действии электрического напряжения происходит пробой и образуется кремниевая плазма, которая генерирует (кроме таких факторов воздействия на нанопористый кремний, как высокая температура и ударная волна) электромагнитное поле. Тогда частицы плазмы совместно с созданным электромагнитным полем, воздействуя на полупроводник, могут усиливать в нем процессы переноса заряда, увеличивая тем самым тепловую составляющую механизма инициирования ЭС на основе нанопористого кремния. В принципе полупроводниковые мостики достаточно активно разрабатываются для инициирования первичных (инициирующих) взрывчатых веществ [4]. Однако следует отметить, что вследствие высокой чувствительности последние в будущем не будут востребованы. Поэтому работы в области их инициирования имеют краткосрочную перспективу.

В настоящее время в мировой практике устройства на основе полупроводниковых мостиков с быстродействующими ключами для инициирования быстрых экзотермических реакций в нанопористом кремнии или в ЭС, где он выступает в качестве горючего, не применяются. Поэтому любые работы в данном направлении имеют несомненную перспективу.

Цель настоящей работы — исследование возбуждения взрывчатых превращений в нанопористом кремнии, пропитанном либо раствором перхлората кальция ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$), играющего роль окислителя, либо раствором взрывчатого вещества НМХ (химическая формула — $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$).

В качестве образцов в работе применялись два вида порошков: порошки высоколегированных бором до 10^{19} см^{-3} (КДБ — кремний, дырка, бор) или мышьяком (КЭМ — кремний, электрон, мышьяк) монокристаллов кремния, в которых нанопоры образовывались в процессе электрохимического травления во фторсодержащем электролите.

Порошок нанопористого кремния запрессовывался в полимерный колпачок (с внешним диаметром 6.7 mm, внутренним диаметром 5.7 mm

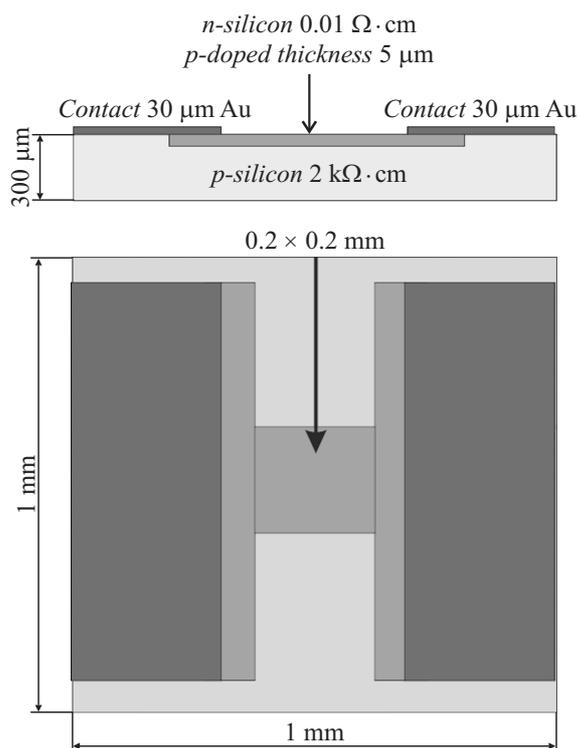


Рис. 1. Полупроводниковый мостик.

и высотой 7 mm), вклеенный в печатную плату размером $20 \times 20 \text{ mm}$ и толщиной 0.5 mm (рис. 1). На печатную плату наклеивалась подложка из кремния *p*-типа размером $1 \times 1 \text{ mm}$ и толщиной $300 \mu\text{m}$. На подложке находился полупроводниковый тепловыделяющий элемент (полупроводниковый мостик) из кремния *n*-типа размером $200 \times 200 \mu\text{m}$ и толщиной $5 \mu\text{m}$ (рис. 1). Центр оси симметрии колпачка совпадал с центром оси симметрии полупроводникового мостика. Во время эксперимента печатная плата устанавливалась на свинцовую пластину толщиной 4 mm .

К контактам из золота шириной $30 \mu\text{m}$ подпаивалась линия передачи с низким волновым сопротивлением ($\sim 3 \Omega$) длиной $15\text{--}20 \text{ cm}$. Линия

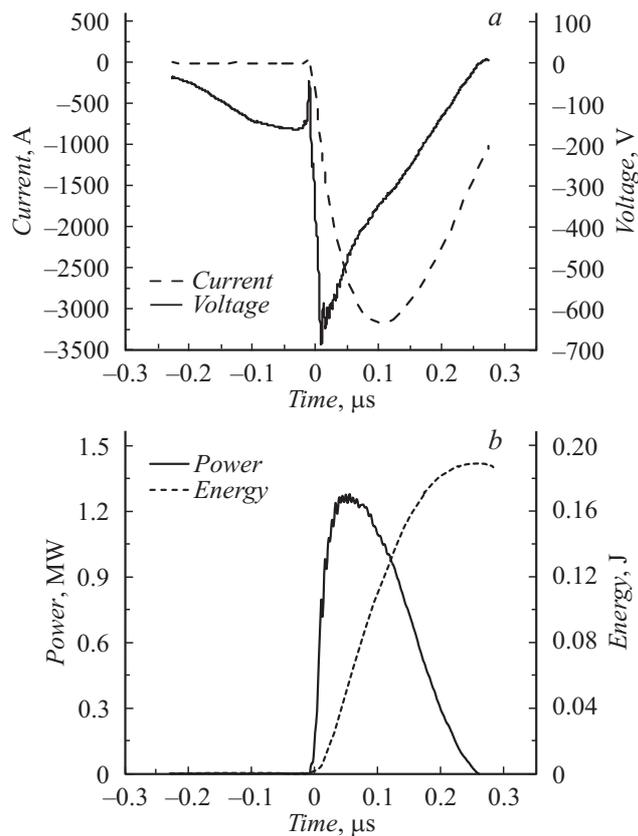


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на мостике (a) и соответствующие им энергия и ее мощность, выделяющиеся на полупроводниковом мостике (b).

представляла собой две полосы из медной фольги, наклеенные с двух сторон на изолирующую полиамидную каптоновую пленку толщиной $100\ \mu\text{m}$. Поскольку время пробега волны по линии ($\sim 1\ \text{ns}$) много меньше интересующего нас диапазона времен, линию можно представить в виде эквивалентной индуктивности, значение которой $\sim 3\ \text{nH}$. Ошибка, вносимая этой индуктивностью в измерения тока и напряжения, составляла менее 10%.

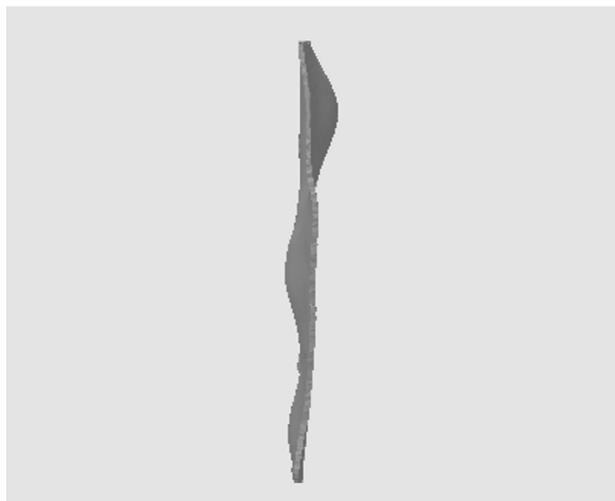


Рис. 3. Конусообразные углубления в пластине-свидетеле.

Засыпанный порошок нанопористого кремния пропитывался окислителем (перхлоратом кальция ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$) или $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$). Полученный таким образом энергонасыщенный состав высушивался и допрессовывался до достижения во всех колпачках одинаковой высоты заряда 5 mm.

В соответствии с электрической схемой испытаний источник питания заряжает конденсатор ($C_0 = 0.32 \mu\text{F}$) до напряжения 1.0–2.0 kV. Через мощный диодистор S_0 и низкоомную линию передачи конденсатор разряжается на полупроводниковом мостике. Под действием импульса электрического тока (рис. 2) происходит электрический взрыв полупроводникового мостика. И как уже отмечалось выше, образуется кремниевая плазма, о чем свидетельствуют два пика на осциллограмме напряжения. В образовавшемся сгустке плазмы достигается высокая концентрация энергии. Температура плазмы по оценкам составляет $\sim 4500\text{--}5000 \text{ K}$ [5], а скорость ее расширения достигает 2000–3000 m/s. Резкое повышение температуры и быстрое расширение приводят к возникновению высокого давления (на уровне нескольких GPa). В энергонасыщенном составе (в нашем случае на ос-

Параметры энергонасыщенного состава и повреждений свинцовой пластины

Вид кремниевого порошка/окислитель	Напряжение, kV	Масса порошка, mg	Диаметр основания конуса d , mm	Глубина h , mm
КДБ/ $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$	2.0	28–30	30–31	6.4–6.6
КДБ/ $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$		18–20	24–25	4.7–4.8
КЭМ/ $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$		23–25	35–37	10.0–10.2
КДБ/ $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$	1.0	50–52	–	–
КДБ/ $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$		10–12	–	–

нове нанопористого кремния) образуется ударная волна, расходящаяся от слоя плазмы. Интенсивность ударной волны и температура плазмы зависят от уровня напряжения. Ударная волна и сильный разогрев ЭС (в том числе за счет процессов проводимости в нанопористом кремнии, которые упоминались выше) обеспечивают в нем возбуждение и распространение взрывчатого превращения. В зависимости от уровня давления и температуры в энергонасыщенном составе в нашем случае могут возникнуть следующие режимы взрывчатого превращения: горение или низкоскоростная детонация [6,7]. Дополнительными факторами воздействия на ЭС при его иницировании могут быть также и высокоэнергетические электроны и ионы плазмы, которые могут служить инициаторами разветвленных цепных реакций [8–13].

Оба типа взрывчатых превращений в исследованных энергонасыщенных составах наблюдались нами во всех экспериментах. Наличие взрывчатых превращений в режиме низкоскоростной детонации фиксировалось по громким звуковым эффектам, разрушению колпачка и печатной платы и отпечатку на свинцовой пластине. Взрывчатые превращения в режиме горения фиксировались по слабым звуковым эффектам, отсутствию состава в колпачке и его виду. Поскольку все элементы экспериментальной установки (колпачок и печатная плата), с которыми контактировало ЭС, изготовлены из неметаллических материалов, отпечаток на свинцовой пластине представлял собой конусообразное углубление различного диаметра d и глубины h (рис. 3). Геометрические размеры конусообразных углублений и параметры зарядов (масса и вид порошка) приведены в таблице.

Результаты экспериментов, представленные в таблице и на рис. 3, свидетельствуют о том, что энергетические параметры ЭС на основе нанопористого порошка КЭМ существенно превосходят аналогичные параметры ЭС на основе порошка КДБ, а энергетические параметры взрывчатого превращения зависят от массы горючего — нанопористого кремния.

Таким образом, в результате исследований установлена возможность надежного инициирования взрывчатых превращений в энергонасыщенных соединениях на основе нанопористого кремния с помощью электрического взрыва полупроводникового мостика при относительно малых энергетических затратах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-29-01085 офи_м).

Список литературы

- [1] Лазарук С.К., Долбик А.В., Жагиро П.В. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 8. С. 917–919.
- [2] Лазарук С.К., Долбик А.В., Лабунов В.А., Борисенко В.Е. // ФТП. 2007. Т. 41. В. 9. С. 1130–1134.
- [3] Kishilev E.G., Gany A. // Proc. of the 6th Seminar „New trends in research of energetic materials“. Pardubice, Czech Republic, 2013. P. 197–206.
- [4] Ма П., Чжан Линь, Чжу Ш., Чень Х. // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47. № 1. С. 115–122.
- [5] Benson D.A., Larsen M.A., Renlund A.M. et al. // Appl. Phys. 1987. V. 62. N 5. P. 1622–1632.
- [6] Физика взрыва. Т. 1 / Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 р.
- [7] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Лукин А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 6. С. 50–57.
- [8] Рашковский С.А., Савенков Г.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 6. С. 73–79.
- [9] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
- [10] Морозов В.А., Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 3. С. 26–32.
- [11] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Брагин В.А., Лукин В.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 10. С. 24–28.
- [12] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Персинен А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, В. 17. С. 28–33.
- [13] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Лукин А.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 22. С. 23–30.