

## БЕСПЛАЗМЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СТИФНАТА СВИНЦА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ МОСТИКОМ

П. Ма, Линь Чжан, Ш. Чжу, Лэй Чжан, Х. Чень

Школа химической инженерии, Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, КНР  
zhusg@mail.njust.edu.cn

Исследован процесс бесплазменного инициирования стифната свинца полупроводниковым мостиком из кремния. Проанализированы характеристики разряда в случае плазменного и бесплазменного инициирования. Показано, что бесплазменное инициирование характеризуется низкой энергией и возможно в случае использования высокодисперсного энергетического материала.

Ключевые слова: бесплазменное инициирование, плазменное инициирование, критические условия, стифнат свинца.

### ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый мостик (ПМ) на основе кремния — важный элемент инициатора взрывчатого вещества (ВВ), который обеспечивает работу детонатора при подаче на него электрического импульса. Полупроводниковый мостик характеризуется как изящное [1], быстрое [2], интеллектуальное [3, 4] и безопасное [5] устройство. Понятие «изящное» подразумевает здесь следующее. Во-первых, это типичные размеры (длина, ширина, толщина) ПМ:  $380 \times 80 \times 2$  мкм. Во-вторых, возможность работать при небольшой энергии, запасенной в системе, следовательно, ее источник может быть компактным. Причем при малой запасенной энергии ПМ может инициировать ВВ вокруг себя за несколько микросекунд и меньше. Полупроводниковый мостик может управляться кодовым сигналом и поэтому применим в логических схемах микроэлектронных устройств. Наконец, ПМ отвечают требованиям противопожарной и электростатической безопасности, предъявляемым к работе с ВВ. В целом ПМ рассматриваются как революционный шаг в устройствах инициирования [5], и имеется много работ, в которых исследуются их конструкции [6, 7], диагностика [8, 9], механизм функционирования [10] и области приложения [5, 11–13].

Как сообщалось в [14], ПМ может расплавиться и испариться, если в нем за короткое время выделится достаточно энергии.

После того как материал мостика испарился, под воздействием приложенного электрического напряжения происходит пробой паров кремния и образуется кремниевая плазма, которая воспламеняет взрывчатые материалы. Идея о плазме полупроводникового мостика предложена в работе [15] и развита в дальнейшем в [8, 11] с целью ее использования в микромеханических системах с полупроводниковыми мостиками. В [16] установлено, что плазма способствует горению при высоковольтном разряде наносекундной длительности. Однако проведенные исследования были в основном сосредоточены на изучении самого ПМ без взрывчатых материалов, поэтому не совсем понятно, как происходит инициирование ВВ полупроводниковым мостиком. В данной работе определены характеристики ПМ при разряде в ВВ путем измерения напряжения, тока и сопротивления. В качестве первичного ВВ использовался стифнат свинца, стабильный при комнатной температуре и легко иницилируемый пламенем, электрической искрой и разрядом статического электричества. В данной работе его инициировали полупроводниковым мостиком без образования плазмы. При таком механизме инициирования энергии требуется даже меньше (0.3 мДж), чем при инициировании с образованием плазмы ( $3 \div 5$  мДж) [17], что очень важно с точки зрения технологии, а именно — миниатюризации боеприпасов [1]. В дополнение к изложенному предложены и подтверждены новые критические условия, позволяющие судить о генерации плазмы, которые являются более обоснованными по сравнению с традиционно используемыми [8].

Peng Ma, Lin Zhang, Shunguan Zhu, Lei Zhang, Houhe Chen.  
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, P. R. China.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемый в экспериментах полупроводниковый мостик — это поликристаллический легированный азотом полупроводник (рис. 1) с сопротивлением  $1.2 \pm 0.1$  Ом. Масса стифната свинца составляла 20 мг.

Схема проведения эксперимента по иницированию стифната свинца показана на рис. 2. При протекании тока через ПМ кремний плавится, испаряется и затем происходит электрический взрыв, который ведет к воспламенению стифната свинца. Регистрировались ток и напряжение. О воспламенении стифната свинца судили по появлению светового сигнала и громкого звука. В обоих случаях, плазменного и бесплазменного иницирования, стифнат свинца реагировал полностью и процесс был воспроизводимым. Свет от взрыва стифната свинца световодом передавался на фотодиод, сигнал которого регистрировался осциллографом.

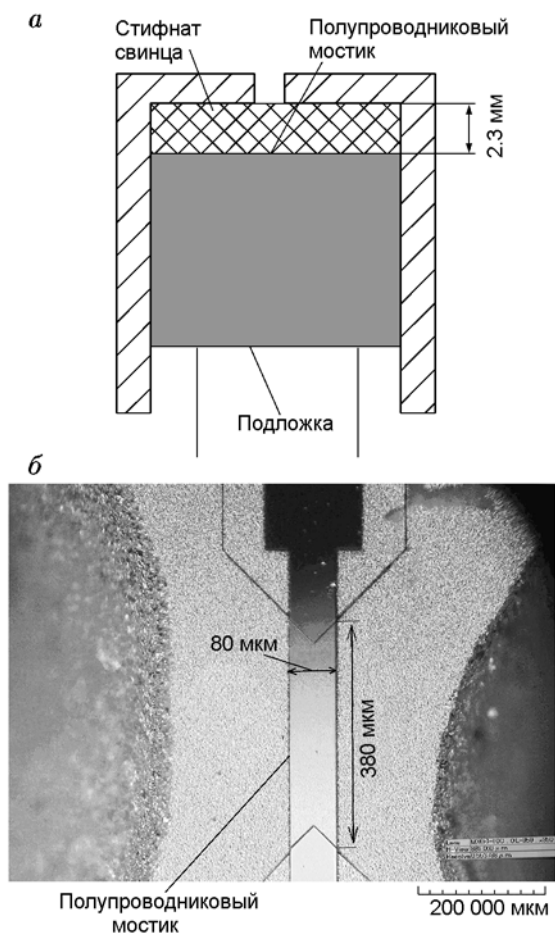


Рис. 1. Полупроводниковый мостик:  
а — сечение, б — вид сверху

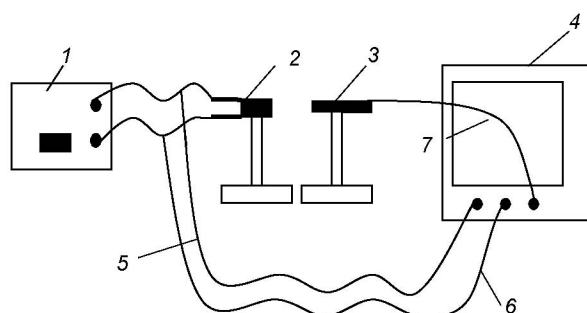


Рис. 2. Постановка экспериментов:

1 — разрядный контур, 2 — образец, 3 — фотодиод, 4 — осциллограф, 5–7 — сигналы датчиков напряжения, тока и света соответственно

нал которого регистрировался осциллографом LeCroy LT374. В экспериментах зарядное напряжение менялось в диапазоне  $7.2 \div 48$  В, емкость конденсатора составляла 1, 2.2, 4.7, 22, 47, 68 и 100 мкФ, а индуктивность контура 0.7 мкГн.

В работе для определения минимальных напряжения и энергии воспламенения, а также стандартного отклонения использован D-оптимальный критерий Нейера [18], позволяющий эффективно оценивать параметры распределения даже при ограниченных предварительных данных. Эксперименты проведены с 14 образцами.

Иницирование оценивали по трем параметрам: по энергии, запасенной конденсатором, по напряжению воспламенения и по энергии, введенной в полупроводниковый мостик, рассчитываемой путем интегрирования произведения тока на напряжение от момента начала роста до появления вспышки света (интегральная энергия  $E = \int (UI)dt$ ). Минимальным напряжением воспламенения считалось напряжение, при котором происходит воспламенение и при этом, если напряжение превосходит это значение, воспламенение регистрируется в 100 % случаев. В данной работе термины «минимальное напряжение воспламенения» и «напряжение воспламенения» равнозначны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Плазменное иницирование стифната свинца

Исследованию процесса иницирования ВВ при образовании плазмы высокого давления, возникающей в результате плавления и

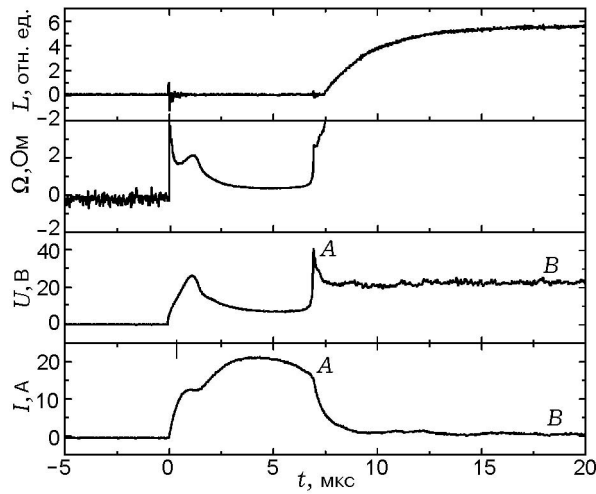


Рис. 3. Плазменное инициирование. Кривые светового излучения  $L$ , сопротивления  $\Omega$ , напряжения  $U$  и тока  $I$

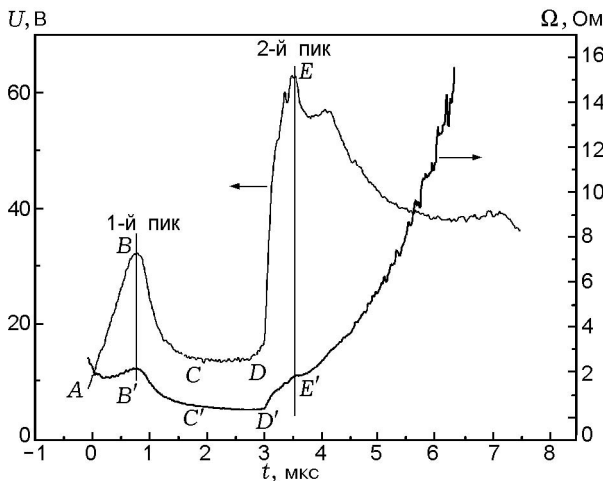


Рис. 4. Зависимости напряжения и сопротивления от времени при плазменном инициировании

испарения ПМ, посвящено много работ. Хорошо известно, что в случае образования плазмы на кривой напряжения  $U(t)$  наблюдаются два пика (рис. 3). В настоящей работе плазма возникала при использовании конденсатора емкостью 47 мкФ с напряжением на нем 20 В. Весь процесс инициирования можно разделить на четыре стадии (рис. 4).

Первая стадия  $AB$ : при протекании тока кремниевый мостик нагревается и остается твердым, напряжение достигает первого пика в точке  $B$ . Вторая стадия  $BC$ : в результате омического нагрева температура кремния растет, мостик плавится и становится жид-

Таблица 1

Минимальное начальное напряжение на конденсаторах различной емкости, необходимое для образования плазмы

$C$ , мкФ	$U$ , В
22	25
47	22.5
68	24.8
100	23.5

ким. Третья стадия  $CD$ : жидкий кремний испаряется и превращается в газ, длительность стадии  $\approx 1.2 \cdot 10^{-6}$  с. Четвертая стадия  $DE$ : вследствие быстрого роста напряжения происходит пробой испаренного кремния и генерируется плазма. Минимальное напряжение воспламенения различно при использовании конденсаторов разной емкости (табл. 1). Оптимальная емкость — 47 мкФ, при такой емкости требуется минимальное напряжение 22.5 В для образования плазмы.

Если на кривой  $U(t)$  присутствуют два пика, это определенно указывает на то, что плазма генерируется [11]. Однако анализ показал, что даже при наличии двух пиков на кривой  $U(t)$  плазма может и не образоваться (рис. 5). Ток быстро падает после второго пика напряжения ( $AB$ ). Если предположить, что плазма образовалась в точке  $A$ , то хотя бы в течение короткого времени ток должен оставаться по

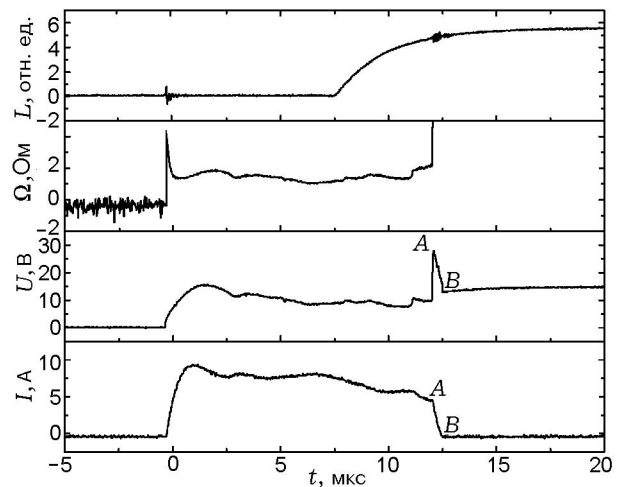


Рис. 5. Бесплазменное инициирование. Кривые светового излучения  $L$ , сопротивления  $\Omega$ , напряжения  $U$  и тока  $I$

меньшей мере на прежнем уровне, поскольку плазма обладает достаточной проводимостью. Однако на кривой тока этого не наблюдается, ток быстро падает до нуля, т. е. плазма не генерируется из-за недостатка энергии.

Сопротивление ПМ рассчитывали, используя кривые напряжения и тока. Хорошо видно, что до второго пика ( $AD'$ ) сопротивление меняется так же, как напряжение (см. рис. 4). Сопротивление медленно растет на участке  $AB'$ , но из-за отрицательного коэффициента сопротивления после точки  $B'$  оно уменьшается. На участке  $B'D'$  жидкий кремний превращается в газ,  $D'$  — это критическая точка, в которой жидкого кремния больше нет. После точки  $D'$  сопротивление растет, пары кремния нагреваются, и в точке  $E'$  кремний в газовой фазе ионизируется. У точки  $E'$  наблюдается плато, длительность которого  $\approx 1.45 \cdot 10^{-7}$  с. При появлении плато формируется второй пик напряжения. Это дает дополнительную возможность определить момент, когда генерируется плазма (точнее, чем по профилю напряжения). После точки  $E'$  сопротивление растет еще быстрее, так как состав плазмы быстро меняется. Максимальное сопротивление в экспериментах достигало 175 Ом, его можно рассматривать как максимальное сопротивление плазмы. Энергию, которая выделяется полупроводниковым мостиком, можно разделить на две части: (а) энергия плазмы с высокой температурой (5 000 К по оценке работы [5]) и длительным временем существования ( $\approx 300$  мкс); (б) энергия, переданная в стифнат свинца.

#### Бесплазменное инициирование стифната свинца

В этом эксперименте для нагрева ПМ и последующего воспламенения стифната свинца использовался конденсатор емкостью 47 мкФ с напряжением 8.2 В. Осциллограммы напряжения, тока, сопротивления и светового излучения показаны на рис. 6. Видно, что сигналы напряжения и тока сильно отличаются от тех, которые наблюдались при плазменном воспламенении. Отсутствие на осциллограмме напряжения двух пиков свидетельствует о том, что плазма не генерируется. Тем не менее, сигнал светового излучения указывает на воспламенение стифната свинца, сопровождающееся звуком удара. Интегральная энергия, введенная в ПМ, составляет 793 мкДж, начальное напряжение 8.2 В, что намного меньше, чем при плаз-

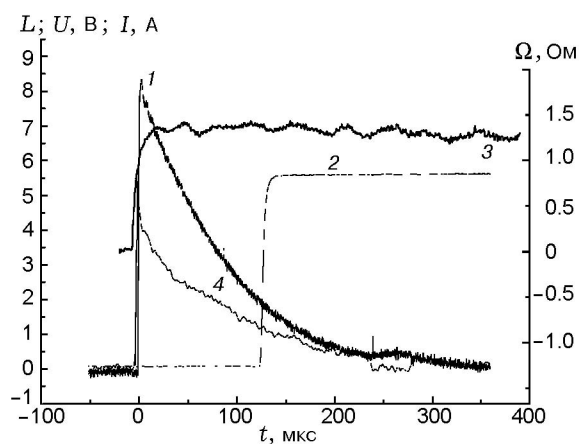


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (1), светового излучения (2), сопротивления (3) и тока (4)

менном воспламенении. Это показывает, что ПМ может работать при меньших энергиях, несмотря на то что плазма не образуется. Данный факт важен для приложений, поскольку чем меньше запасенная энергия, тем компактнее источник энергии и миниатюрнее система инициирования.

Как видно на рис. 6, максимальные ток и напряжение достигают значений 8.4 А и 4.6 В соответственно. Кремний нагревался и плавился, но, поскольку запасенная энергия мала, только часть его превратилась в жидкость или газ. Для образования ионизованного газа энергии было недостаточно, и поэтому в отличие от типичной осциллограммы напряжения (см. рис. 4) в данном случае на осциллограмме присутствует только один пик. Тем не менее стифнат свинца взрывается, о чем свидетельствует появление светового сигнала до того момента, как ток и напряжение падают до нуля.

Во время разряда сопротивление возрастает от 1.7 до 2.1 Ом с небольшой задержкой относительно появления напряжения, а затем уменьшается до нормального значения. Фазовый переход — основной фактор, влияющий на сопротивление. Сопротивление ПМ до и после воспламенения приведено в табл. 2. Шесть ПМ были испытаны при напряжении 8.2 В и емкости 47 мкФ. В этой серии опытов максимальное изменение сопротивления составило 0.076 Ом, а среднее значение 0.049 Ом, что меньше 5 % исходного сопротивления.

При увеличении в 1750 раз (рис. 7) видно, что на пленке мостика небольшая область ( $\approx 0.1$  % всей поверхности) у уголка ПМ была

Таблица 2  
Сопrotивление ПМ  
до и после иницирования ( $C = 47$  мкФ)

$\Omega_1$ , Ом	$\Omega_2$ , Ом	$\Delta\Omega$ , Ом
1.263	1.314	0.051
1.283	1.344	0.061
1.177	0.932	-0.245
1.143	1.181	0.038
1.130	1.183	0.053
1.207	1.302	0.095

Примечание.  $\Omega_1$  — сопротивление до иницирования;  $\Omega_2$  — сопротивление после иницирования;  $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$ .

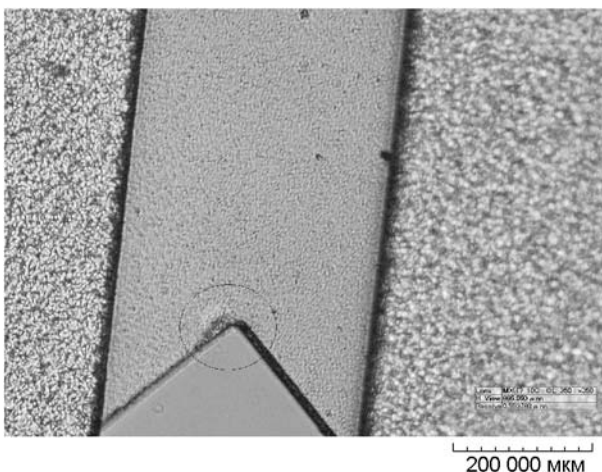


Рис. 7. Поверхность ПМ после воспламенения (4.7 мкФ, 19 В, увеличение 1 750)

расплавлена. Это свидетельствует о том, что вводимая энергия не распределяется равномерно и в первую очередь выделяется в отдельных точках, в данном случае в области фаски (небольшой выемки). Фотография ПМ после воспламенения подтверждает, что при протекании тока в пленке мостика происходит слабая реакция без сильного фазового изменения или абляции всей поверхности.

После воспламенения сопротивление ПМ возросло примерно на 5 % по сравнению с начальным. Однако площадь поверхности, подвергшаяся абляции, составила лишь 0.1 % полной поверхности. Это различие указывает на то, что в микроструктуре пленки происходят изменения, которые заметно влияют на сопротивление, но не видны на снимке.

Энергия, необходимая для фазового пере-

хода, может быть рассчитана. Масса пленки ПМ, вычисленная путем умножения ее объема на плотность кремния, составляет  $1.7475 \cdot 10^{-10}$  кг. Энергия, необходимая для плавления, равна 0.315 мДж, для испарения — 2.393 мДж (суммарная энергия 2.708 мДж). Для расчета использованы следующие термодинамические характеристики кремния:  $\rho = 2\,330$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_p = 700$  Дж/(кг·К),  $\Delta H_{melt} = 50.55$  кДж/моль и  $\Delta H_{vap} = 384.22$  кДж/моль. Оценка показывает, что нет оснований предполагать образование плазмы, исходя из условия, что пленка мостика нагревается как целое.

### Обоснование бесплазменного воспламенения

При плазменном иницировании процесс воспламенения не зависел от размера частиц стифната свинца: 100 или 1 мкм. Однако бесплазменное иницирование происходило только при размере частиц меньше 20 мкм (табл. 3).

Энергия, выделившаяся в ПМ, разделяется на две части: первая потрачена на слабый нагрев всего мостика, а вторая часть, вследствие концентрированного выделения энергии в локальной области, привела к фазовому переходу части кремниевой пленки. Затем кремний в газовой или жидкой фазе передал эту энергию фазового перехода стифнату свинца и остыл, вернувшись в твердое состояние.

По сравнению с крупнозернистым порошком частицы высокодисперсного порошка более плотно контактируют с полупроводниковой пленкой, удельная поверхность такого порошка больше, расстояние между частицами меньше, передача энергии фазового перехода кремния происходит эффективнее и, наконец,

Таблица 3  
Влияние размера частиц ВВ на процесс иницирования

Размер частиц, мкм	Плазменное иницирование	Бесплазменное иницирование
>100	+	-
50	+	-
20	+	-
10	+	+
1	+	+

Примечание. + воспламенение; - отсутствие воспламенения.

при мелких частицах лучше образуются «горячие точки». Температуры плавления и кипения кремния равны 1687 и 3446 К соответственно. Исходя из вида ПМ (см. рис. 7) можно заключить, что во время разряда температура на очень ограниченном участке (область в углу мостика) достигала по крайней мере 1687 К. С другой стороны, напряжение резко возросло, достигло пика и сохранялось в течение  $2 \cdot 10^{-4}$  с (см. рис. 6). Эти время и размер области эрозии мостика соответствуют условиям, необходимым для формирования «горячих точек» [17]. Все изложенное указывает на возможность воспламенения высокодисперсного стифната свинца малой энергией без образования плазмы.

#### Влияние емкости конденсатора

В экспериментах использованы конденсаторы емкостью 1, 4.7, 22, 47, 68 и 100 мкФ. На рис. 8 представлены данные по минимальному напряжению воспламенения и по энергии, введенной в ПМ. Видно, что минимальное напряжение воспламенения уменьшается с ростом емкости конденсатора, так как чем больше емкость конденсатора, тем больше энергии запасено в нем. Напротив, минимальная энергия воспламенения увеличивается с ростом емкости конденсатора. По критерию минимальной энергии, введенной в ПМ, оптимальной является емкость конденсатора 1 мкФ, а по напряжению — 100 мкФ. Это расхождение значительно осложняет правильный выбор емкости конденсатора для экспериментов.

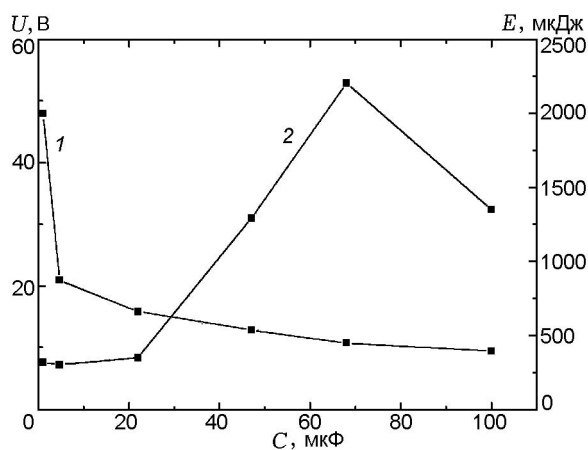


Рис. 8. Зависимости минимальных иницирующего напряжения (1) и введенной в ПМ энергии (2) от емкости конденсатора

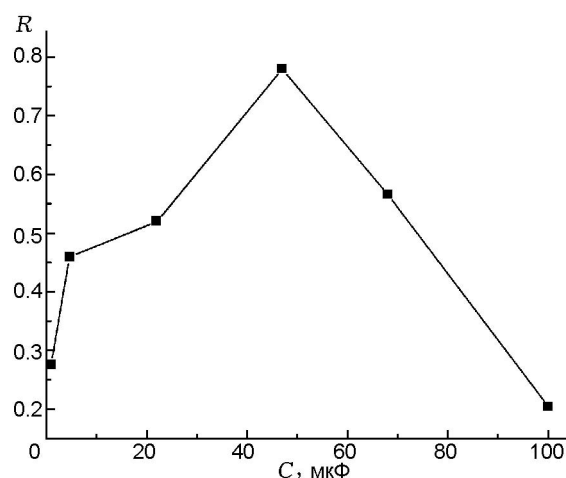


Рис. 9. Зависимость коэффициента использования энергии от емкости конденсатора

Компромисс между различным поведением минимального иницирующего напряжения и минимальной энергии иницирования может быть достигнут введением коэффициента использования энергии  $R = E_{in}/E_{st}$ , где  $E_{in}$  — интегральная энергия, введенная в ПМ, а  $E_{st}$  — энергия, запасенная в конденсаторе. Энергия  $E_{st}$  отражает влияние минимального воспламеняющего напряжения, а  $E_{in}$  — энергии иницирования. Параметр  $R$  был использован для анализа процесса воспламенения. Представленная на рис. 9 зависимость  $R(C)$  показывает, что  $R$  достигает максимума при  $C = 47$  мкФ, и, следовательно, конденсатор такой емкости является оптимальным.

#### Повторное использование ПМ

Как обсуждалось выше, сопротивление ПМ слабо меняется, если плазма не образуется. Например, первичное сопротивление ПМ составляло 1.09 Ом, а после протекания тока возросло до 1.109 Ом, т. е. осталось практически таким же. Для того чтобы выяснить, что происходит при повторном использовании ПМ, проведены следующие эксперименты. Для иницирования стифната свинца были взяты как новые, так и повторно используемые ПМ. Применяли конденсаторы емкостью 2.2, 4.7, 22 и 47 мкФ. Для повторно используемых ПМ минимальная энергия воспламенения оказалась даже меньше, чем для новых (табл. 4). Этот эффект, по-видимому, связан с тем, что после первого протекания тока микроструктура полупроводниковой пленки меняется, хотя это сла-

Таблица 4  
Энергия иницирования  
для новых и повторно используемых ПМ

C, мкФ/U, В	E, мкДж	
	новый ПМ	повторно используемый ПМ
2.2/21.5	350.48	291.82
4.7/19.3	414.87	396.42
22/16.8	1 511.05	1 202.85
47/9.3	1 647.77	1 550.67

бо отражается на сопротивлении и не видно на микрофотографии пленки. Поэтому при повторном нагреве ПМ иницирование происходит при меньшей энергии. Этот эффект указывает возможный путь дальнейшего уменьшения энергии воспламенения.

**Сравнение бесплазменного и плазменного иницирования**

Эксперименты проведены с одним и тем же разрядным контуром, но с различными конденсаторами. Энергия плазменного и бесплазменного иницирования приведена в табл. 5. Видно, что и энергия, и минимальное напряжение при бесплазменном иницировании меньше, чем при плазменном.

С другой стороны, следует отметить, что для бесплазменного иницирования необходим высокодисперсный стифнат свинца с размером частиц ≈1 мкм, в то время как для плазменного иницирования этот фактор не играет роли. Результаты показывают, что нецелесообразно добиваться интенсивного нагрева всего

ПМ с образованием плазмы, поскольку можно уменьшить энергию, необходимую для воспламенения при бесплазменном иницировании, если использовать высокодисперсный энергетический материал.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

О генерации плазмы можно судить по выполнению следующих условий. Во-первых, на кривой напряжения должно быть два пика. Во-вторых, ток после второго пика напряжения должен убывать медленно, поскольку плазма является проводником. Если же ток вырос ко второму пику, а после этого быстро уменьшился до нуля, то это свидетельствует о том, что энергии недостаточно для поддержания существования плазмы. Отличительными особенностями плазменного иницирования являются высокая запасаемая энергия, короткое время и независимость от размера частиц стифната свинца.

Бесплазменное иницирование характеризуется низкой энергией и необходимостью использовать высокодисперсный энергетический материал. Стифнат свинца иницируется в результате выделения в нем энергии при фазовом переходе кремния из состояния газа или жидкости обратно в твердое состояние. В ходе бесплазменного иницирования сопротивление ПМ остается практически неизменным, и лишь малая часть поверхности подвергается изменениям. Энергия, выделяемая ПМ при нагреве, концентрируется главным образом в районе небольшой выемки (фаски), где и происходят интенсивный разогрев кремния и формирование «горячих точек». При повторном использо-

Таблица 5  
Минимальное иницирующее напряжение и энергия при различных способах иницирования

Способ иницирования	C, мкФ							
	2.2		4.7		22		47	
	U, В	E, мДж	U, В	E, мДж	U, В	E, мДж	U, В	E, мДж
Плазменное иницирование	—	—	23.0	0.630	18.3	1.319	16.5	2.150
Бесплазменное иницирование	21.0	0.302	19.4	0.472	15.9	1.163	12.9	1.292

Примечание. U — минимальное иницирующее напряжение, E — интегральная энергия.

вании ПМ минимальное инициирующее напряжение намного меньше, чем при использовании нового ПМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Bickes R. W., Jr.** Smart semiconductor bridge (SCB) igniter for explosives // 3d Canadian Symp. on Mining Automation, September 14–16, 1988.
2. **Tovar B. A. M.** Electrothermal Transients in Highly Doped Phosphorous Diffused Silicon-On-Sapphire Semiconductor Bridge under High Current Density Conditions: PhD dissertation. — University of New Mexico, 1993.
3. **Detonator:** U.S. Pat. 4869170 / Dahmberg S., Jonsson E., Lilius P., et al. Issued on September 26, 1989.
4. **Bickes R. W., Jr, McCampbell C. B.** Semiconductor bridge (SCB) research and development // Sandia National Laboratories Report. — 1991. — SAND 91-0310C.
5. **Benson D. A., Larsen M. E., Renlund A. M., Troot W. M., Bickes R. W.** Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosive // Appl. Phys. — 1987. — V. 62, N 5. — P. 1622–1632.
6. **Semiconductor bridge (SCB) initiator:** US Pat. 4708060, Nov. 1987 / R. W. Bickes, Jr., A. C. Schwarz.
7. **Blankenship D. M.** Semiconductor bridge (SCB) packing // Sandia National Laboratories Report. — 1986. — SAND86-2211 (DE 87-005620).
8. **Jong-Uk Kim, Chong-Ook Park, Myung-Park, Sun-Hwan Kim.** Characteristics of semiconductor bridge (SCB) plasma generated in a micro-electro-mechanical system (MEMS) // Phys. Lett. A. — 2002. — V. 305. — P. 413–418.
9. **Kim J., Schamiloglu E., Tovar B. M., Jungling K. C.** Measurement of plasma electron density generated by a semiconductor bridge (SCB) // Electron. Lett. — 1994. — V. 30. — P. 603–604.
10. **Kim J., Navn K. S., Jungling K. C.** Plasma electron density generated by a semiconductor bridge as a function of input energy and land material // IEEE Trans. on Electron Devices. — 1997. — V. 44, N 6. — P. 1022–1026.
11. **Headley P. S., Bickes R. W., Jr.** A semiconductor bridge (SCB) primary explosive detonator // Sandia National Laboratories Report. — 1986. — SAND 86-2045.
12. **Grubelich M. C., Bickes R. W., Jr.** Ignition and deflagration-to-detonation. Characteristics of HMX and PETN columns employing SCB ignition // Sandia National Laboratories Report. — 1995. — SAND 95-2579C (DE96012949).
13. **Matveev I., Matveeva S., Korolev Yu. D., Frants O. B., Landl N. V.** A multi-mode plasma pilot // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 8–11 Jan. 2007, Reno, Nevada.
14. **Key-Nam Lee, Myung-Park, Sung-Ho Choi, Chong-Ook Park, Han S. Uhm.** Characteristics of plasma generated by polysilicon semiconductor bridge (SCB) // Sensors and Actuators A. — 2002. — V. 96. — P. 252–257.
15. **Semiconductor explosive igniter:** US Pat. 3,366,055, 30 January 1930 / Hollander L. E., Jr.
16. **Mintusov E., Serdyuchenko A., Choi I., Lempert W. R., Adamovich I. V.** Mechanism of plasma assisted oxidation and ignition of ethylene-air flows by a repetitively pulsed nanosecond discharge // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32. — P. 3181–3188.
17. **Song Quan-cai** Theory of explosive [M]. — Beijing: Ordnance Industry Press, 1997.
18. **Neyer B. T.** A D-optimality-based sensitivity test // Technometrics. — 1994. — V. 36, N 1. — P. 61–70.

*Поступила в редакцию 25/XI 2009 г.,  
в окончательном варианте — 20/IV 2010 г.*