

반도체 브릿지의 플라즈마 특성 연구

이용조*, 장석태*, 장승교*

A Study on the Plasma Characterization of Semiconductor Bridge

YeungJo Lee*, SukTae Chang* and SeungGyo Jang*

ABSTRACT

When driven with a short (less than $30\mu\text{s}$) low-energy pulse, the semiconductor bridge(SCB) produces a hot plasma that ignites explosive. The shape of plasma was observed using ultra high speed camera, the generation and the duration time of plasma were estimated by analyzing the ultra high speed camera image. The more energy supplied, the sooner the formation of the plasma was, and the size of the plasma was increased in proportion. The voltage variation of the bridge was measured and analyzed by comparing with the ultra high speed camera image.

초 록

반도체 브릿지(Semiconductor bridge, SCB)에 $30\mu\text{s}$ 이내의 짧은 시간 동안 펄스 형태의 에너지를 공급할 경우 SCB는 화약을 발화시킬 수 있는 플라즈마를 생성한다. 초고속 카메라를 이용하여 플라즈마의 형태를 관찰하였고 발생시간, 지속 시간 등을 알아보았다. 공급된 에너지의 양이 많을수록 플라즈마는 빨리 생성되고 그 크기도 비례적으로 증가하였다. SCB 작동시 브릿지 양단의 전압 변화를 기록하여 초고속 카메라 상과 비교함으로써 전압 곡선의 변화를 해석하였다.

1. 서 론

현대 첨단병기는 점차 고가화, 복잡화함에 따라 더욱더 안정성이 강조되고 있고, 특히 점화 부품들은 단 1회 작동 부품으로 신뢰성 및 안정성 확보가 필요하다. 대부분의 전기적 점화장치(Electro Explosive

Device, EED)는 점화전류가 흐름으로써 전기적으로 가열되는 금속 발열선(Hot Bridge-wire)을 이용한다. 일반적으로 금속 발열선에 수 암페어의 전류를 인가하면 발열선 온도는 약 900K 까지 상승되고, 가열된 발열선 위로 압축된 화약에 열이 전달되어 착화된다. 이러한 형태의 HWI(Hot Wire

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

Initiator)는 실용적이지만 고주파, 정전기, 표류전압 등에 민감하여 우발점화의 가능성이 있어 안전에 대한 별도의 대책을 필요로 하고 있고 또한 작동시간도 수 밀리(mili) 초가 소요된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 최근 반도체 브릿지에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다^(1,2).

SCB를 이용한 점화부품의 기본 동작원리는 온도가 증가함에 따라 저항이 감소하는 특성을 지닌 불순물이 첨가된 반도체에 전류가 흐르면 전류-저항에 의하여 주울 가열(Joule heating)이 일어나고 그에 의하여 반도체 자체는 온도가 상승하게 된다. 온도증가에 의하여 저항치는 감소하므로 급격한 가열이 연쇄적으로 일어나고 되고, 이로써 반도체의 평형증기압에 이르러 고체로부터 기체상태의 분자로 증발하게 된다. 이 증발된 분자는 주위에 강한 전압밀도에 의하여 순간적으로 여기상태가 되어 플라즈마를 형성하게 되고, 형성된 플라즈마의 온도는 대략 6000K를 얻게되어 이들이 소량의 점화분말로 전자기적인 힘에 의하여 전달되면 점화분말은 집적된 플라즈마의 높은 에너지를 받아들여 점화 하게 된다. 이러한 반도체 소자는 소형의 플라즈마의 발생소자로서 플라즈마 형성시간이 수 마이크로 초이며, 동작에 필요한 에너지 필스는 1~5mJ로 매우 작은 에너지이다.

반면에 금속발열선도 플라즈마 형태로 점화할 수 있으나, 이때는 800V~2000V의 고압과 수백 암페어의 전류를 필요로 한다. 동일한 플라즈마 효과가 실리콘을 이용한 브릿지에서는 낮은 전압과 10A 정도의 전류필스로 생성될 수 있다. 실리콘은 또한 효과적인 열전도체로써 낮은 열 임피던스 브릿지로 설계할 수 있도록 해주고 그 결과 안정성을 향상시킨다.

현재까지 SCB의 물리적 특성, 소재 제조공정 연구, 전기적 특성연구, 작동회로 제작연구 등이 발표되고 있으나^(3,4), SCB 연구의 핵심인 플라즈마 생성 및 플라즈마와 화약과의 작동에 관한 연구는 아주 미약하고, 발표된 논문 수도 적은 상태이다. 그 이유는 SCB 작동에서 플라즈마는 수 μ sec안에 생성되고, 또한 생성된 플라즈마는 눈으로 거의 확인하기가 힘들기 때문에 많은 연구자들은 추론적인 설명으로 결론을 내리고있다. 이 플라즈마 생성에 대한 증거를 확인하기 위해서는 아주 빠른 시간 변화 동안에 일

어나는 동작을 관찰 할 수 있는 초고속 촬영 카메라가 필요로 한다. 이 장비를 이용하면 SCB에서 발생하는 플라즈마의 거동을 알 수 있고, 또한 전자감용 장치가 부착되어 있어 눈으로 인식 할 수 없는 플라즈마의 형태, 발생시간, 크기 등을 사진으로 촬영할 수 있다. 본 연구에서는 SCB 소재를 직접 제조하여 이 소재에 대한 플라즈마 발생시간, 지속시간, 크기 및 거동 등을 관찰하여 SCB 거동과 플라즈마 특성을 연관하여 연구하였다.

2. SCB 소재 제작 공정

발열선은 대개 정전기적 안전성을 위하여 1 Ω 의 저항을 갖는다. 1 Ω 의 발열선 저항 값은 화약분말을 점화시키는데 필요한 에너지와 정전기에 노출되었을 때 브릿지에 의한 에너지 방출과의 절충점이다. 알맞은 크기의 브릿지를 만들기 위하여 우리는 약 $10^{-3}\Omega$ cm의 저항 값을 갖는 고농도로 도핑된 반도체 물질을 필요로 하였다.

반도체 브릿지는 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 H자 모양으로 이는 그림의 점선 안쪽 부분으로 고농도로 도핑된 폴리 실리콘 층이다. 브릿지의 넓이 W는 넓은 실리콘 패드를 연결하는 실리콘 부위의 넓이에 의해서 결정되고 브릿지의 길이 L은 브릿지위를 덮고 있는 알루미늄랜드 사이의 간격에 의해 결정되며, 브릿지의 두께 t는 실리콘 웨이퍼 위에 입혀지는 폴리 실리콘 층의 두께에 의해서 결정된다. 1 Ω 의 전형적인 브릿지의 크기는 길이(L)40 μ m, 넓이(W) 80 μ m, 두께(t) 1 μ m의 사각 칩이고, 알루미늄 랜드의 두께는 약 1 μ m이다. 알루미늄 랜드의 모양과 크기는 랜드와 랜드사이 브릿지의 저항 보다 충분히 작게 하기 위하여 랜드와 실리콘의 접촉면적을 최대화하도록 설계하였다.

본 SCB 공정에는 실리콘 위에 이산화 실리콘(SiO₂) 증착시킨 웨이퍼를 이용하였다. SCB의 측면(A-A)이 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에는 단일 SCB에 대해 나타나 있지만 실제 제작시에는 웨이퍼 단위로 이루어지므로 한번의 공정으로 수백, 수천개의 SCB가 제조된다. 먼저 실리콘 웨이퍼나 SiO₂층이 증착이 되는데, 이는 웨이퍼와 에칭 경계면과의

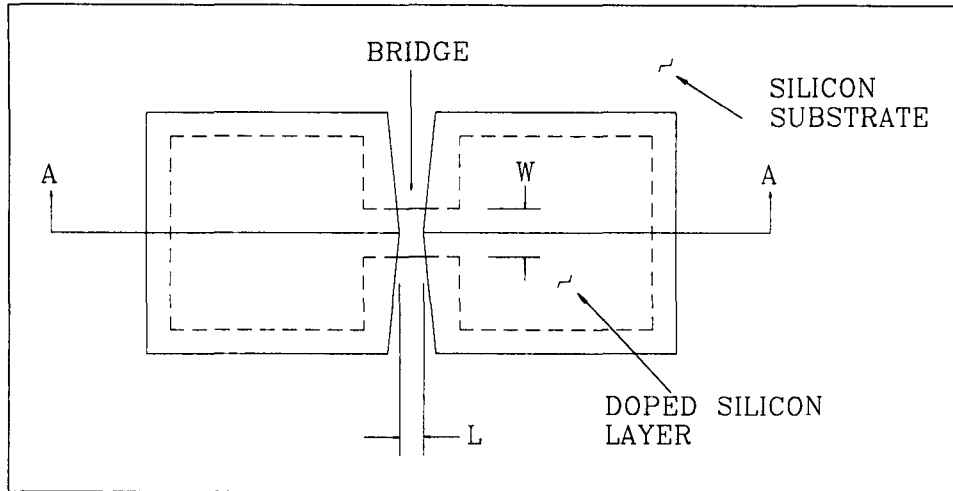


Fig. 1. A schematic diagram of SCB. The bridge is the doped silicon area between the large aluminum lands. The large land/silicon overlap minimizes ohmic contact between the land and the silicon. The lands provide a means for electrical input to the bridge. Current flows from land to land through the bridge.

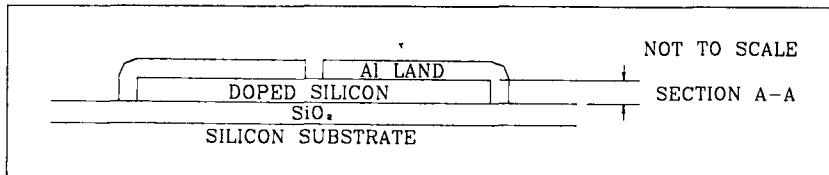


Fig. 2. Cross section of a SCB

전기적 절연을 가능하게 해주고 SCB 작동시 열에너지를 손실도 방지해 준다.

다음에 브릿지가 만들어질 1 μ m의 도핑 안된 폴리실리콘 층을 이산화 실리콘층 위에 Chemical Vapor Deposition(CVD) 공정을 이용하여 증착시킨다. 폴리실리콘 층에 이온을 도핑하므로써 전하 운반자(charge carrier)를 증가시키는데 실리콘의 이온가인 +4가와 다른 이온가를 갖는 양이온을 산화물의 형태로 도입하고 이온가가 +4보다 큰 이온을 도핑할 때에는 전자가, 이온가가 +4보다 적을때는 양전자가 생기게 되고 이때 각각을 n형, p형 반도체라고 한다.

우리는 본 실험에 전자를 도핑한 n형 반도체를 이용하였다. 폴리실리콘 층에 인(phosphorous)을 P₂O₅의 형태로 약 1100°C에서 100분간 폴리실리콘 위로 확산시키는데 이때 단 한번의 소둔(annealing)

으로는 균일하고 가능한 한 낮은 저항 값을 나타내는 브릿지를 얻기 어려우므로 수회에 걸쳐 소둔을 할 필요가 있었다.

P₂O₅를 고온에서 실리콘 웨이퍼 상에 도핑시키면 대부분의 산소는 대기 중으로 증발하고 인(P)만이 실리콘 사이로 확산되어 들어가는데 이온 결합시 인은 +5가의 이온가를 갖는데 이들의 +4의 이온가를 갖는 실리콘 사이에 들어가 결합함으로써 여분의 전자가 생기게 되고 따라서 저항 값이 감소하게 되는데 이때 약 8 \times 10⁻⁴ohm-cm의 저항 값이 얻어지고 이는 n형 도펀트인 인(P)의 농도가 약 7 \times 10¹⁹P atoms/cm³에 해당된다. 실리콘의 원자농도가 5 \times 10²²atoms/cm³ 임을 고려하면 실리콘에 대한 인의 농도비는 0.0014에 불과하다. 정의상 반도체는 그 저항 값이 약 10⁻²에서 10⁹ohm-cm의 사이의 값을 가져야 하나 우리가 얻은 브릿지의 저항치 8 \times 10⁻⁴ohm -cm

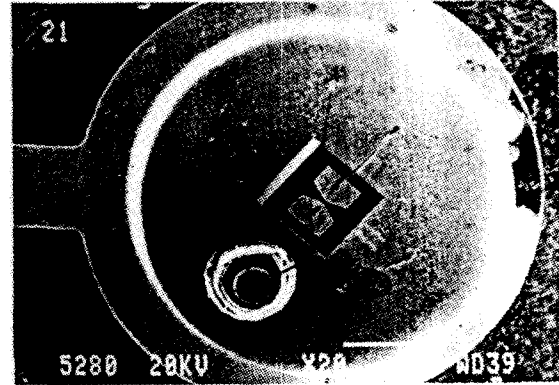
는 반도체라기 보다는 도체 쪽에 가까운 값이다.

도핑된 폴리실리콘층 위에 실리콘 에칭시 마스크로 쓰기 위한 산화 층을 성장시킨다. H자 형태의 폴리 실리콘의 망사구조를 웨이퍼 상에 만들기 위하여 석판 인쇄기법(photolithography)이 사용된다. 즉 우리가 원하는 부분을 H자 형태로 약품 처리하여 산화막을 제거한다. 그 후 망사구조의 각 H자형의 두 수직한 다리부분에 알루미늄을 음 전착을 만들어 준다. 이는 일반적인 집적회로에 금속을 입히는 과정으로써 웨이퍼 전체에 1마이크론 두께의 알루미늄으로 코팅한 후 필요한 부위에 금속막을 제거하기 위해 석판 인쇄기법이 사용된다. 제거되는 알루미늄 막의 형태를 결정하기 위한 마스크가 SCB의 길이를 결정한다. 다음으로 좋은 음 전착과 층 사이의 점착성을 얻기 위하여 약 30분간 소결(sintering)을 한다.

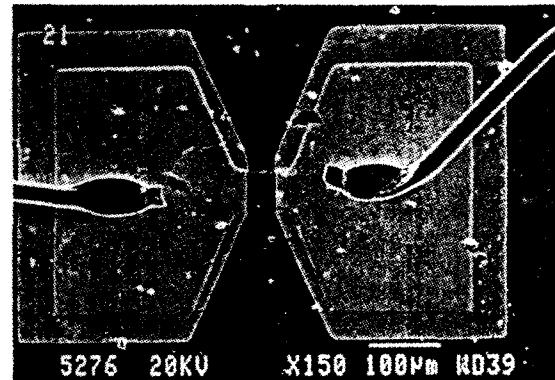
완성된 웨이퍼는 주사위 모양으로 잘라서 TO-18 header에 에폭시를 이용하여 접착, 고정시킨다. 1 mil(직경 0.001인치, 길이 0.01인치)의 알루미늄(Al)선이 TO-18 can 상의 두 전극과 SCB 알루미늄 랜드 사이에 ultrasonic welding 방법으로 용접된다. 이 알루미늄 선의 선 저항은 0.012 Ω 이고 tensile strength는 2~7grs이다.

이와 같은 상태로 아래의 SCB 전기적 특성은 측정할 수 있으나 실제로 착화기로 쓰일 때는 화약분말 충전의 과정이 추가된다. 화약분말은 TO-18 header에 잘 들어맞는 한쪽이 막힌 작은 실린더에 화약을 약 12000psi의 압력으로 채운 후, TO-18 header에 용접한다. 이 과정에서 알루미늄 선이 화약 충전압력에 의해 파괴될 수 있으므로 세심한 주의가 필요한데, 때에 따라서는 알루미늄 선의 접합부위에 에폭시로 고정하는 것도 효과적이라는 보고도 있다.

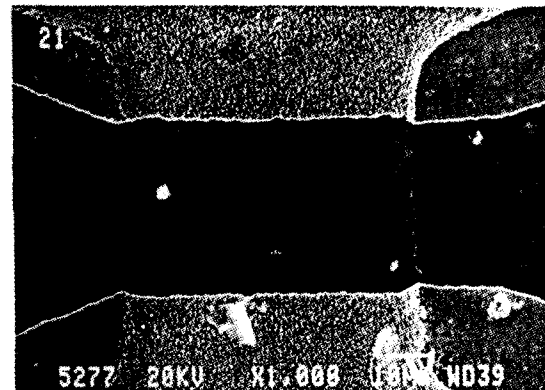
본 연구에 사용된 SCB를 확대한 Scanning Electron Microscopy(SEM)사진을 그림 3에 소개하였다. 본 사진은 고속 촬영을 위한 준비단계에서 촬영한 것이다. 그림 3(a)에서는 SCB 웨이퍼가 TO-18 can위에 접착제를 이용하여 고정된 것을 볼 수 있는데 브릿지의 한쪽은 TO-18 can 몸체와 용접되어있고 다른 한쪽은 glass-to-metal 밀봉된 핀에 용접된 것을 알 수 있다. 3(b) 사진에는 웨이퍼 위쪽만을 확대하여 촬영하였고 3(c) 사진은 브릿지 부분



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Scanning electron micrographs of the SCB (a) Low magnification of top view of the SCB initiator (b) Semiconductor bridge with aluminum wire (c) Bridge area.

만을 확대하여 보여주고 있는데 검게 보이는 부분이 브릿지 영역이고 밝게 보이는 부분이 알루미늄 렌드 영역이다.

3. SCB의 작동 및 전기적 특성

3.1. 실험방법

SCB를 작동시키기 위해서는 매우 빠른 속도의 에너지 펄스(pulser)를 필요로 하므로 전압 펄스의 상승시간(rising time)이 100 nsec 이내인 펄스 케이블 방전 점화 장치를 설계, 제작하였다. 본 방전 시스템은 약 30~100nsec의 상승시간과 약 30 μ sec의 지속시간(duration time)을 갖는 직류 사각 펄스 전류를 발생시킨다. 안전장치의 개념으로 4자리의 숫자코드를 입력해야만 작동하도록 고안하였다. 본 장치의 전기적 스윙칭은 크리트론 스위치 장치를 이용하였다. SCB의 전기적 특성을 기록하기 위하여 전압분리기 회로와 전류측정 저항 기술이 쓰였다. 점화 신호 발생기의 대략적인 구성도는 그림 4와 같다. 발생하는 동안 직류펄스의 전류는 일정하게 유지되고 알루미늄 렌드사이의 전압 차는 오실로스코프로 기록하였다. 전류 값은 시료의 종류에 따라 10A에서 40A사이의 값을 적절히 가해주었고 전압 차는 펄스의 초기부터 약 30 μ sec 동안 측정되었으며 모든 전압측정 실험은 실온에서 이루어졌다.

SCB의 렌드사이 양단의 저항은 제작시 여러 가지

조건에 따라 달라질 수 있는데 우선 폴리 실리콘에 이온을 도핑할 때 전자 또는 양전자의 도핑 량에 따라 달라질 수 있고 또한 저항이 $R = \rho L/A$ (여기서, ρ : 고유저항, L : 길이, A : 면적)이므로 브릿지의 길이 대 넓이의 비율에 따라 달라질 수 있다. 이밖에 알루미늄렌드 증착시 접촉부위와 알루미늄선 용접시 용접부위저항 등에 따라 저항 값이 달라질 수 있다. 본 실험에 사용된 대표적인 시료들의 크기와 저항, 최고 전압 값, 가해진 전류 등이 표 1에 요약되어있다. 전원 공급 회로의 스위치의 저항이 약 1 Ω 이므로 공급된 전류 값은 간단한 산술식으로 구해진다. 실용단계에서는 고유저항이 측정된 후 우리가 원하는 저항 1 Ω 을 만들기 위하여 길이와 넓이를 적당히 조절해야하는데 이때 금선 용접시 생기는 저항치나 접촉면사이의 저항 값 등을 고려하여 조절해야한다.

SCB가 정상적으로 작동하였을 때 고온의 플라즈마가 발생되므로 초고속 카메라를 이용하여 플라즈마가 발생하는 시간, 플라즈마의 지속 시간, 크기 등을 측정하였다. 초고속 카메라 촬영시 입력 전류는 표 2와 같이 10A와 40A사이의 값을 취하였고 플라즈마의 초고속 상은 Imacon 790 카메라를 이용하여 촬영하였다. 카메라의 렌즈 바로 앞에는 2배 확대 렌즈를 붙였고 경통을 지나 20배의 현미경 대물 렌즈를 통하여 촬영하였으므로 총 40배의 배율로 촬영하였다.

입력 전류 값이 15A 이하 일 때는 플라즈마의 발생 시간이 수 마이크로 초 정도 일 것으로 예측하여

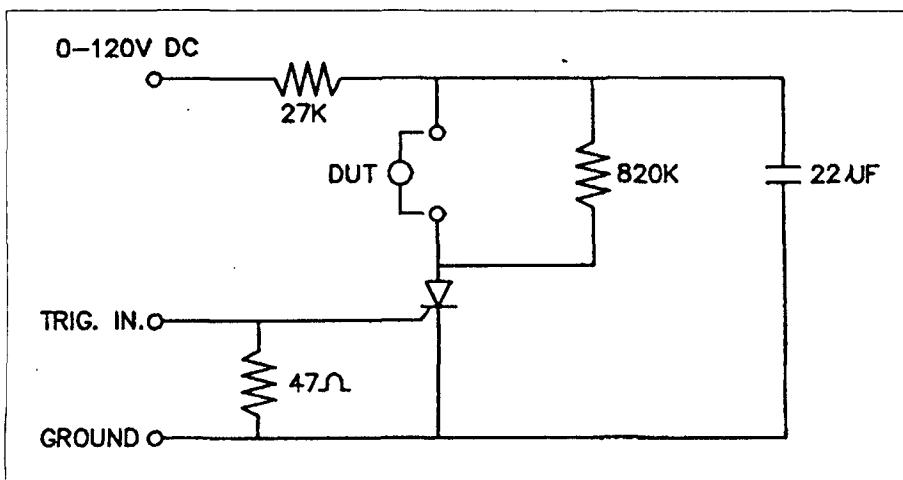


Fig. 4.
Schematic
diagram of pulse
generator

Table 1. Experimental condition and description of the samples

s/n	Dimension of the bridge (μm^3)	Resistance (Ω) [†]	Maximum bias (V)	Applied current(A)
9701	100×100×2	2	20	6.9
9702	100×200×2	1	15	7.9
9703	100×300×5.3	1.8	27	10
9801	40×80×1	1.5	25	10.4
9802	40×80×1	1.2	21	10
9803	40×80×1	1.2	30	14.3

[†] the resistance measured by the four point probe method

Table 2. The test condition of the samples for ultra high speed camera

s/n	Resistance(Ω)	Voltage(V)	Applied current(A)
2	1.45	20	10
4	1.40	25	13
3	1.45	30	15
13	1.40	38	20
6	1.50	50	25
18	1.40	57	30
23	1.30	72	40

2×10^6 frame/sec의 속도로, 20A 이상 일 때는 2×10^7 frame/sec의 속도로 촬영하였다. 속도가 2×10^6 frame/sec일 경우에는 각 사진들간의 시간 간격은 500nsec이고 노출 시간은 100nsec이고, 2×10^7 frame/sec 경우에는 사진들간의 시간 간격은 50nsec이고 노출 시간은 10nsec를 취하였다. 초고속 카메라 촬영에 사용된 시료의 저항 값과 입력 전류 값을 표 2에 정리하였다.

3.2. 결과

브릿지 양단의 전압차 값의 변화를 오실로스코프를 통해서 측정한 결과가 그림 5와 그림 6에 나타나 있다. s/n 9801~9803 경우에는 두 개의 뚜렷한

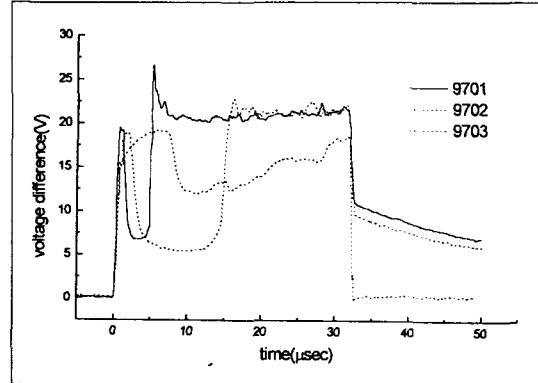


Fig. 5. Voltage measured across the SCB device and the leads for s/n 9701~9703

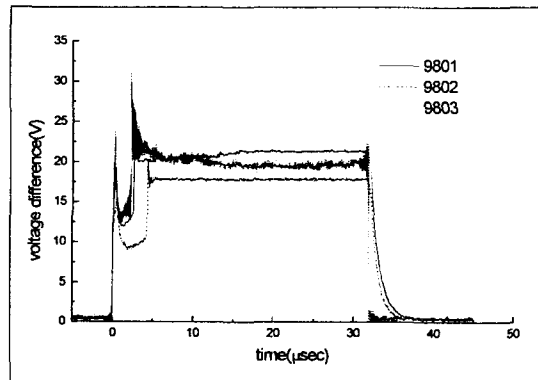
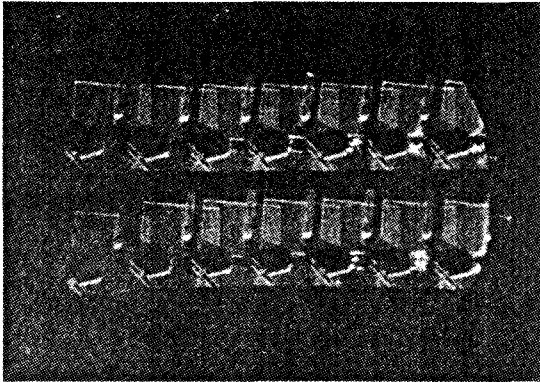


Fig. 6. Voltage measured across the SCB device and leads for s/n 9801~9803

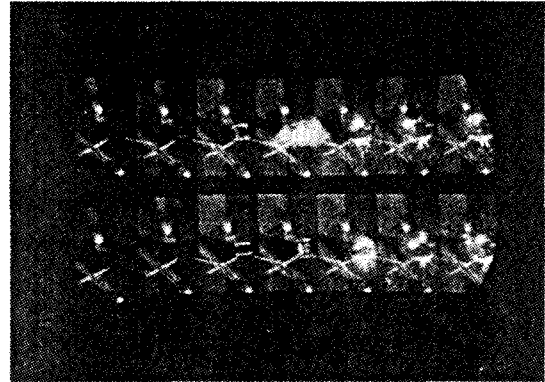
Table 3. The applied current and the second maximum time

s/n	Dimension of the bridge cross section(μm^2)	Applied current(A)	Second maximum time(μs)
9701	200	6.7	5.4
9702	400	7.5	16.3
9703	1590	9.6	-
9801	80	10	2.67
9802	80	9.5	4.35
9803	80	13.6	2.27

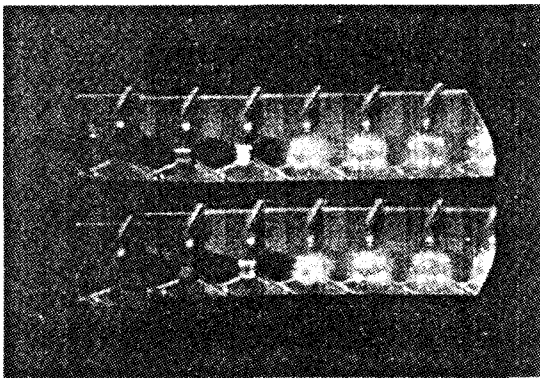
peak가 주목할만한데 하나는 측정초기에 나타나고 다른 하나는 수 마이크로 초 후에 나타난다. 두 번째 peak다음에 바로 이어 일정한 전압 값이 유지가 되



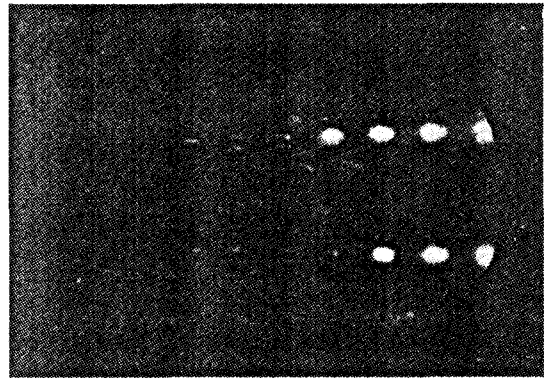
(a) s/n 2



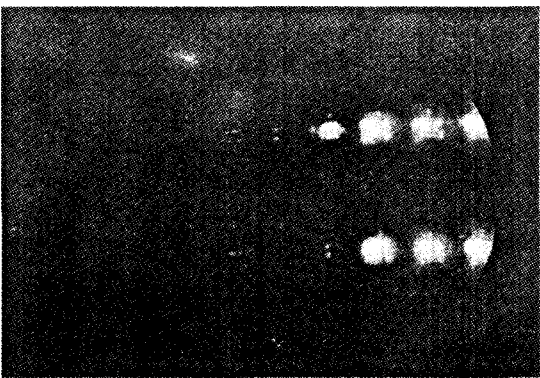
(b) s/n 4



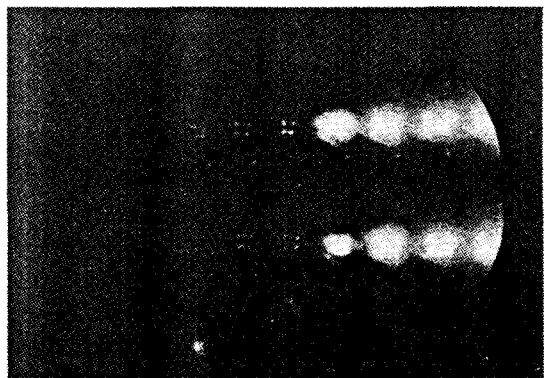
(c) s/n 3



(d) s/n 13



(e) s/n 6



(f) s/n 18



(g) s/n 13

Fig. 7.

Ultra high speed camera images of the SCB operation. Frames are spaced 500nsec apart for (a) to (c) and 50nsec for (d) to (g) and alternate from bottom to top, with the first at the lower left and the last at the upper right. The edge burn process is evident in the frame 5, 6, 7 and 8 of (a) and 3 of (c).

는데 이 값은 펄스가 가해지고 있는 한 유지가 된다.

시간이 경과함에 따라 전압 값이 국소적으로 최소 값과 최고 값을 형성하는데 그 중에서 두 번째 최고 값이 형성되는 시간은 아래 표 3과 같다.

표 3에서 브릿지의 단면적이 동일할 경우 인가된 전류의 양이 많을수록 두 번째 peak의 최고 값 도달 시간이 짧아짐을 알 수 있고, 또한 전류의 양이 유사한 경우라도 브릿지 단면적에 큰 차이가 있을 경우 전압 변화 형태가 서로 다를 수 있다.

초고속 카메라를 이용하여 SCB에 전류가 인가되었을 때 브릿지를 중심으로 촬영한 결과가 그림 7에 나와있다. 각 사진에는 14회 내지 18회 촬영한 사진을 아래 줄 제일 왼쪽에서부터 위줄 제일 오른쪽까지 나열되어있다. s/n 2의 경우 5번 프레임에서 보면 브릿지와 랜드와의 접선에서부터 녹아 들어가고 시간이 경과 할 수록 차츰 안쪽으로 진행하여 11번 프레임에서 보면 브릿지 부분이 가장 밝은 빛을 발하는 것을 알 수 있다. 초고속 카메라 촬영시 전류가 15A 이하인 경우는 프레임사이의 시간 간격이 500nsec 이므로 s/n2의 경우 브릿지가 가장 밝은 빛을 발하는 시간은 약 5.5 μ s이다. 아래의 그림 7에서 보면 인가된 전류 값이 클수록 브릿지가 밝은 빛을 발하기 시작하는 시간은 짧아지고 밝은 빛이 지속되는 시간은 길어짐을 알 수 있다. 또한 전류 값이 클수록 발광하는 부분의 크기도 비례적으로 커짐을 알 수 있다. 표 4에는 각 시료에 대하여 밝은 빛을 발하기 시작하는 시간을 나타냈다.

그림 8은 초고속 카메라 시험을 한 후 세 시료를 SEM을 통하여 150배의 배율로 본 상이다. s/n 2의

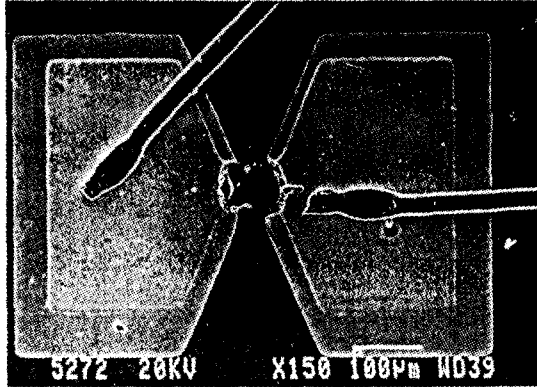
경우 브릿지 영역만이 플라즈마화하여 유실되었으나 s/n 13과 s/n 18의 경우는 브릿지 영역 뿐 아니라 알루미늄 랜드 영역까지도 녹아 없어진 것을 볼 수 있다. 아래의 세 SEM 사진으로 미루어보아 입력 전류 값이 크면 클수록 플라즈마화하는 부분이 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

Table 4. Turn-on time in ultra high speed camera

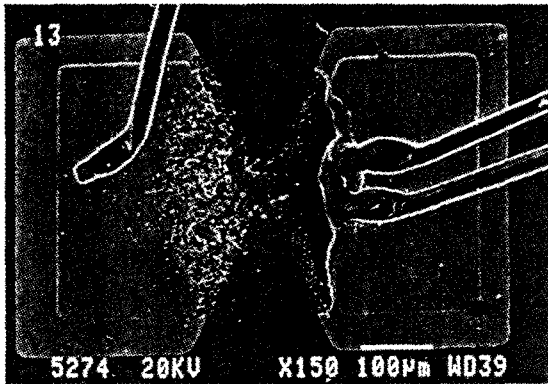
s/n	Current(A)	Turn-on time(μ s)
2	10	5.5
4	13	4.0
3	15	3.5
13	20	0.6
6	25	0.5
18	30	0.45
23	40	0.35

3.3. 분석

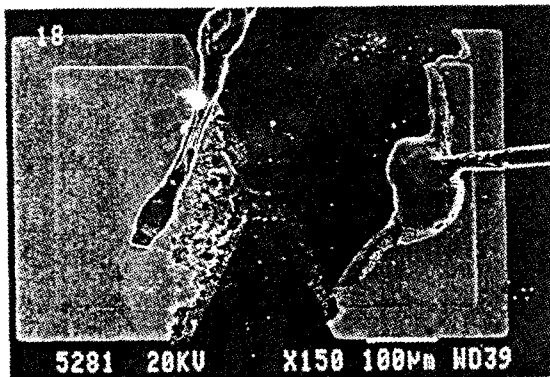
브릿지에 일정한 펄스의 전류 값이 가해지고 있을 때 동일한 조건하에서 브릿지 양단의 전압변화는 저항 값의 변화를 시사한다고 볼 수 있다. 위 결과에서 보듯이 SCB는 펄스가 가해지면 다양한 저항의 변화를 나타낸다. 여기서 SCB가 작동하는 동안 어떤 원인에 의해 저항의 급격한 변화가 생기는데 대하여 추론해보고 저항변화에 따른 SCB의 물리적 특성 변



(a) s/n2



(b) s/n13



(c) s/n18

Fig. 8. SEM images of the SCB after operation

화에 대해 논의해보고자 한다.

상승시간이 수백 나노 초 이하이고 작동 시간이 수십 마이크로초인 40A 이내의 직류 사각 펄스전류를 일반적으로 약 $1\Omega \sim 2\Omega$ 의 저항을 갖는 SCB에 인가하고 시간에 따른 전압의 변화를 관찰하면 한 개 또는 두 개의 뚜렷한 전압 값의 최고치를 관찰할 수 있다. 여기서 인가되는 전류의 값이 매우 중요한 역할을 하는데 전류 값에 따라서 전압 변화 곡선이 달라질 뿐 아니라 SCB의 작동 형태도 달라진다. 전압 대 시간의 곡선에서 그 값들의 급격한 감소는 방전을 의미한다. SCB에서의 방전은 브릿지의 실리콘을 기화시켜 substrate 표면위에 이온화된 실리콘 기층을 형성하는데 이 기층은 알루미늄 랜드까지 확산된다. 일단 브릿지가 기화되면 실리콘 증기로 흐르는 전류는 가열된 플라즈마를 형성하게 된다.⁽⁴⁾

시간에 대한 전압 변화 곡선은 초고 값이 두 개일 경우 다음과 같은 4 단계로 구분할 수 있고 각 단계는 서로 다른 물리현상이 존재한다고 볼 수 있다.

제1단계: 전압이 급격하게 증가하여 첫 번째 최고치에 이르는 단계

제2단계: 첫 번째 최고치로부터 급격히 전압이 감소하여 두 번째 최고치로 급격하게 전압 값이 증가하기 바로 전 단계,

제3단계: 전압이 다시 한번 급격하게 증가하는 단계로 조건에 맞는 펄스를 가할 경우 전압이 무한대로 증가하게 된다. 9703 시료의 경우 급격한 전압증가를 볼 수 없는데 그 이유에 대해서는 아래에 설명하겠다.

제4단계: 두 번째 peak의 최고 값에서부터 전압이 떨어져서 펄스가 가해지고 있는 동안 일정전압이 유지되는 단계.

각 단계별로 SCB의 물리적 변화를 관찰해보는 방법 중에 하나로 SCB와 같이 매우 짧은 시간에 작동하는 장치에 대해서는 초고속 카메라를 이용하고 있는데 위에서 4단계로 분리한 시간에 따른 SCB 양단 사이의 전압과 500ns 또는 50ns 간격으로 SCB의 모양을 포착할 수 있는 초고속 카메라의 시간에 따른 SCB 상을 비교함으로써 우리는 위 각 단계별 전압 변화의 원인을 추론해 보기로 하자.

그림 9에서는 SCB 작동시 촬영한 초고속 카메라 상과 전압 대 시간의 변화 곡선을 비교하였다. 비록

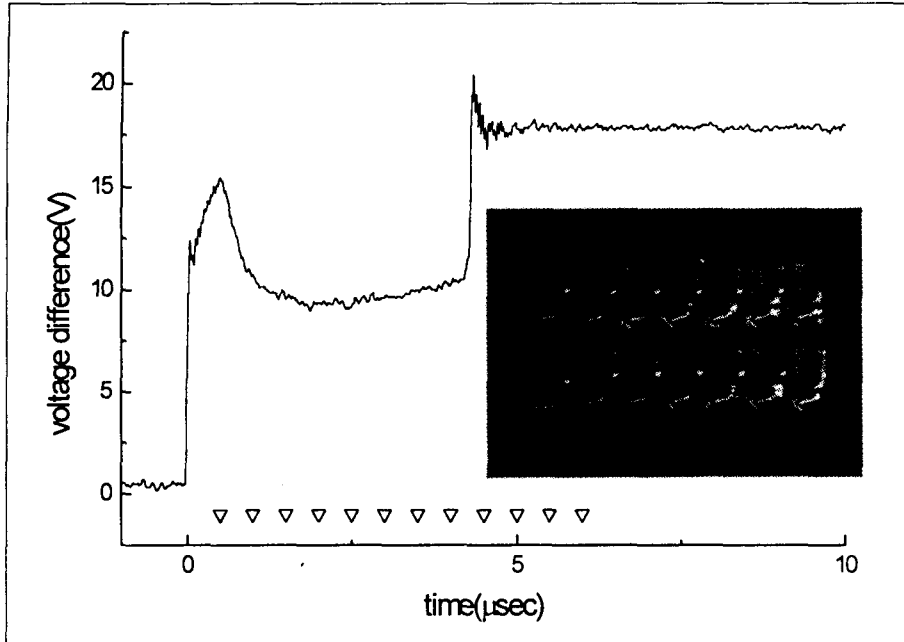


Fig. 9
Typical voltage
characteristics
and ultra high
speed camera
images

초고속 카메라 촬영과 동시에 측정하지는 않았지만 같은 방법으로 동시에 제작한 시료들이기 때문에 저항 값도 유사하고 동일한 형태의 10A의 펄스 전류를 공급하였으므로 동시에 한 실험으로 간주하여 비교 할 수 있다. 그래프 밑에 12개의 역삼각형은 초고속 카메라의 셔터가 열려진 시점을 표시하고 있다. 이때의 초고속카메라 사진은 그림 9 에 함께 나타나 있다.

길이 $40\mu\text{m}$, 넓이 $80\mu\text{m}$, 두께 $1\mu\text{m}$ 의 폴리실리콘 브릿지가 왼쪽 아래에 있는 첫 번째 상의 중앙에 보인다. 장치의 전기적 연결을 가능케 하는 알루미늄랜드가 브릿지의 양쪽측면에 보인다. 위의 초고속카메라 촬영시 10A의 전류를 $30\mu\text{sec}$ 동안 펄스 형태로 가해주었다. 전류는 먼저 브릿지의 양쪽측면에 발광하면서 방전하도록 하는데 이 발광하는 부분은 차츰 브릿지의 중앙으로 퍼져 들어간다. 본 방전은 브릿지부분의 실리콘을 증발시키고 이온화된 실리콘 증기 층을 형성케 하고 일단 브릿지가 증기화 되면 전류가 증기를 통하여 흐르고 이어 플라즈마를 발생시킨다.

먼저 제1단계에서 전하들의 반응속도는 펄스의 상승시간보다 매우 작으므로 전압의 증가시간은 펄스

의 상승시간과 일치한다고 볼 수 있다. 제1단계에서 전압이 증가하는 곡선의 기울기는 본 시료의 경우 모두 동일하여야한다고 보는데 이는 공급된 직류펄스의 초기 상승시간 (33nsec)과 밀접하게 연관되어 있다고 본다. 제1단계에서의 초고속 카메라 상은 SCB의 어떤 물리적 변화도 포착하지 못하였다. SCB에 전기적으로 어떠한 변화도 없다면 1단계에서의 전압의 최고치가 펄스가 가해지고 있는 한 유지되어야하나, 위 실험 데이터를 보면 전압의 급격한 강하를 볼 수 있는데 이는 어떠한 이유 하에 SCB의 저항에 변화가 생겼음을 시사한다.

제2단계에서 전압이 급격히 감소하는 것은 SCB의 dynamic impedance 감소에 기인한다고 볼 수 있다. Dynamic impedance의 감소는 전기적 방전의 결과로 반도체의 pn-junction이나 고체상 플라즈마에서 관찰되는 Avalanche breakdown 또는 Zener breakdown^(5,6)과 유사한 현상이다. Zener breakdown은 일반적으로 반도체에 높은 전기장이 걸릴 때 공유결합 속의 전자가 자유롭게되어 전자와 양전자의 2종류의 전하가 생성되어 전류에 기여한다. 에너지밴드 측면에서는 valence band내의 전자가 다른 어떤 입자의 간섭도 받지 않은 상태에서

conduction band로 전이하는 과정을 의미한다. 이러한 전하들이 서로 충돌하는 사이에 외부전장으로 부터 충분한 에너지를 얻어 아직 속박되어있는 전자들과 충돌하여 전자들을 자유전자로 만드는데 이는 마치 눈사태와 같이 자유전자의 수를 기하급수적으로 증가시키는데 이를 avalanche breakdown이라 한다. 우리는 SCB의 양단에 걸리는 사각펄스가 pn-junction에 역 바이어스가 걸릴 때와 전기적으로 유사하다는 가정 하에 근사적으로 breakdown 전장을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{max} = \left(\frac{2qN_dV_a}{\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}}$$

여기서 q는 전자의 전하량으로 1.6×10^{-19} C, N_d 는 도핑된 입자의 농도, V_a 는 인가된 전압이고 ϵ_s 는 permittivity를 의미하고 그 값은 8.854×10^{-12} C²/N m² 이다. 예를 들어 도핑된 입자의 농도가 7×10^{19} /cm³이고 인가된 전압이 20V일 경우 E_{max} 는 7.114×10^7 V/cm이다. 이때 breakdown 전압은 근사적으로

$$V = \frac{\epsilon_s E^2}{2qN_d}$$

이고 여기서 E는 적용된 전장이다. 도핑된 입자의 농도에 대한 breakdown 전압은 그림 10에 나타나

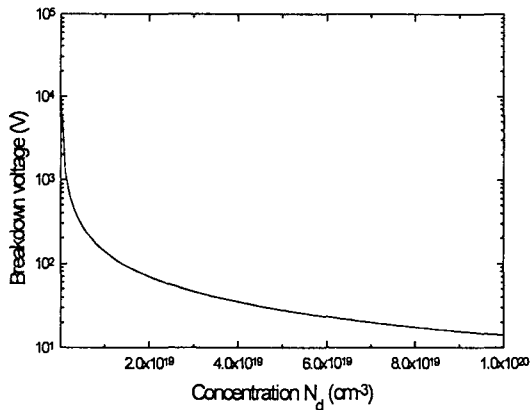


Fig. 10. Breakdown voltage of the silicon as a function of dopant concentration

있다. 그림 10은 실리콘에 이온의 도핑농도가 2×10^{19} 을 초과하면 100V이하에서 avalanche 또는 Zener breakdown이 일어날 수 있음을 시사하고 있다. 위의 그림 초고속카메라 상에서 브릿지와 substrate가 접한 경계 면에서부터 녹아들고 브릿지의 중앙 부분까지 단계적으로 녹아들이 진행되는 것을 볼 수 있다.

액체 상태에서의 반도체의 저항은 $80 \mu\Omega\text{cm}$ 로 도핑된 실리콘의 고체 상태에서보다 약 10배정도 저항이 감소한다⁽⁷⁾. 결국 시간 변화에 따른 브릿지의 저항 값은 고체상과 액체상의 비율에 따라 결정되는데 고체상의 저항 값이 액체상의 값보다 10배정도 크므로 대부분 저항은 고체상의 비율에 의존한다고 볼 수 있다. 본 실험에서 본다면 2단계 마지막에서의 저항은 2단계 초기의 저항(static impedance)보다 1/2 내지 1/3정도밖에 감소하지 않았다. 이는 브릿지의 일부가 고체상으로 남아있을 수도 있고 또는 브릿지의 일부가 증기 상태로 증발하여 impedance의 감소를 약화시켰다고 볼 수 있다. 즉 $R = \rho L/A$ 에서 브릿지가 액화되어 ρ 가 감소하나 이 브릿지의 일부가 증발함으로 인하여 L은 일정하고 A가 작아져서 결국 R값의 ρ 에 의한 감소는 둔화된다. breakdown의 말기에 일부 이온들은 계속되는 가열로 증발되고 상대적으로 적은 저항을 갖는 액체상의 감소를 초래한다.

제3단계에서는 브릿지의 대부분이 증발하여 dynamic impedance는 급격히 증가하게되고 인가된 펄스가 일정 기준을 만족한다면 플라즈마 방전이 유도된다. 위의 초고속 카메라 상과 전압 변화 곡선을 비교한 그림에서보면 제3단계와 4단계 초기에 브릿지 부분이 밝은 빛을 발하는데 이것이 플라즈마라고 생각된다. Sandia Lab의 논문⁽⁸⁾에서는 Optical multichannel analyzer를 통하여 브릿지가 녹아 밝은 빛을 발할 때 방사 스펙트럼(emission spectra)을 구하여 광원의 성분 분석을 하였고 4단계 초기에 가장 밝은 빛을 발할 때의 온도를 약 5500K로 예측한 바 있다. 이 온도는 브릿지가 플라즈마 상태로 되었을 때에만 도달 가능한 온도이다. 또한 위의 논문⁽⁸⁾에 의하면 플라즈마 방전 조건 중에 하나는 주어진 bridge의 단면적에 대한 펄스의 전류 치인데 그들은 방전에 필요한 전류 한계치와 SCB의 단면적 사이에

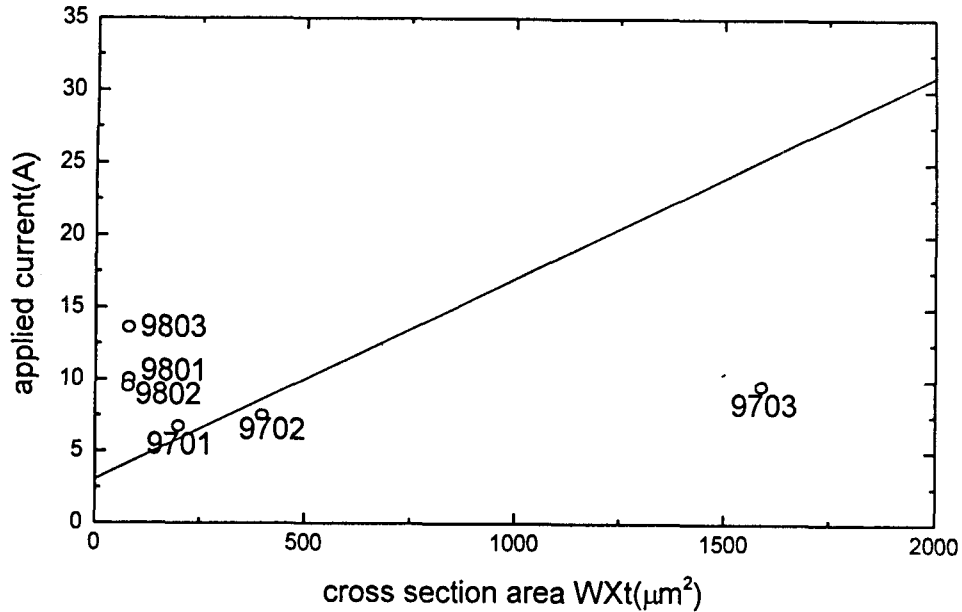


Fig. 11. Threshold current vs the cross-sectional area of the bridge(width times bridge thickness) for several different bridge

다음과 같은 관계가 있음을 실험적으로 구해낸 바 있다.

$$I_{th} = 0.014(A/\mu m^2) W \times t + 3$$

여기서 I_{th} 는 전류 한계치이고 W 와 t 는 각각 bridge의 넓이와 두께이다. 이는 그림 11에 나타나 있다.

이 실험 결과에 의하면 우리가 사용한 시료의 플라즈마 방전을 위한 최소 한계 전류 값은 s/n 9701, s/n 9702, s/n 9703 시료의 경우 각각 5.8A, 8.6A, 25.3A이다. 즉, s/n 9701, s/n 9801~9803 시료의 경우 우리의 실험 조건은 플라즈마를 발생시키기 위한 충분한 조건이었고 s/n 9702, s/n 9703 시료의 경우는 플라즈마를 발생시키기 위한 한계 전류 치에 못 미치는 값이었다. s/n 9703 시료의 시간에 대한 전압곡선을 보면 다른 시료들의 그것들과 큰 차이를 보이고 있으므로 전압 변화 형태가 플라즈마 발생 유무와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 위의 그래프에서 보면 입력 전류 값이 플라즈마 발생 한계 전류 값 보다 크면 클수록 플라즈마가 발생되기 시작하는 시간은 짧아짐을 알 수 있다.

마지막 4단계 초기에서 플라즈마 방전이 일어나는데, 본 고온의 플라즈마는 분발형태의 화약을 열적으로 점화시킬 수 있게된다. 고온의 증발된 브릿지 생성물이 화약사이를 스며들면서 열 대류 현상에 의해 플라즈마의 에너지가 전달되는 메커니즘이 제시된바 있다⁽⁹⁾. 즉 전류 펄스가 브릿지를 증발시키고 실리콘 플라즈마를 가열하고 뜨거운 실리콘 증기는 브릿지 위에 압축된 화약 분말 사이에 스며들고 화약 입자 위에 놓여 그들을 점화온도까지 가열하는 역할을 해 주게된다.

4. 결 론

펄스형태의 에너지가 공급되었을 때 SCB의 전기적 특성 변화를 브릿지 양단의 전압 변화를 통하여 알아보았고 전압 곡선의 변화와 초고속 카메라 상을 비교함으로써 특이한 전압 곡선의 변화는 SCB가 용융되고 이어서 플라즈마로 바뀌어 실리콘의 저항 값이 바뀌는데 기인함을 알아내었다. 또한 전압 곡선 변화 형태와 초고속 카메라 사진을 비교함으로써 실

리콘 브릿지가 용융되는 시점과 플라즈마가 발생하는 시점을 알아내었는데 입력 전압 값이 크면 클수록 플라즈마 발생 시간이 짧아지고 플라즈마의 크기도 증가함을 알 수 있었다.

동일한 단면적의 브릿지에 전류량을 증가시키면 플라즈마 발생시간이 비례적으로 짧아지므로 화약을 짧은 시간 내에 점화 시켜야하는 용도에는 기존의 발열선을 사용하는 것보다 유리함을 제안하였다.

Reference

1. R. W. Bickes et al., "An Overview of Semiconductor Bridge, SCB, Applications at Sandia National Laboratories", AIAA 95-2549, 31th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 1995
2. D. W. Fyfe et al., "BNCP Prototype Detonator Studies Using a Semiconductor Bridge Initiator", SAND 94-0336C, 1994
3. 장승교, 이용조, "Semiconductor Bridge(SCB) 연구 I", ADD 보고서 MSDC-420-970271, 1997
4. K. Willis and D. Whang, "Semiconductor Bridge Technologies", AIAA-95-254831th, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 1995
5. R. S. Muller and T. I. Kamins, Device Electronics for Integrated Curcuits(2nd edition), John Wiley & Sons, 1986
6. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, 1986
7. G. J. Galvin et al., "Time-Resolved Conductance and Reflectance Measurements of Silicon during Pulsed-Laser Annealing" Physical Rev. B 27(2) 1983
8. D. A. Benson et al., "Semiconductor Bridge: A Plasma generation for the Ignition of Explosives", J. Appl. Phys. 62(5) 1987
9. M. J. Martinez and M. R. Bear, "Microconvective Heating of Granular Explosives by a Semiconductor Bridge", SAND89-2033, 1989